

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Stanovení součinitele relaxace beta-metody pro modelování
tunelů

Evaluation of the Relaxation Coefficient of Beta-Method
for the Modelling of Tunnels

Student: Bc. Ondřej Brodzki

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Brodzki**
Studijní program: N3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3607T035 Geotechnika
Téma: Stanovení součinitele relaxace beta- metody pro modelování tunelů
Evaluation of the Relaxation Coefficient of Beta- Method for the
Modelling of Tunnels

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Princip beta-metody, přístupy ke kvantifikaci součinitele relaxace
3. Stanovení součinitele relaxace srovnáním rovinného a prostorového numerického modelu tunelů
4. Srovnání hodnot součinitele relaxace získaného variantními přístupy
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

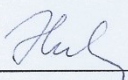
1. Klepsatel, F., Mařík, L., Frankovský, M. *Městské podzemní stavby*. Jaga: Bratislava, 2005. ISBN 80-8076-021-7.
2. Klepsatel, F., Kusý, P., Mařík, L. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. Jaga: Bratislava, 2003: ISBN 80-88905-43-5.
3. Kolymbas, D. *Tunelling and Tunnel Mechanics*. Springer: Berlín, 2005. ISBN-10 3-540-25196-0.
4. Dao, V. Tunnel design considering stress release effect. *Water Science and Engineering*, 2009, 2(3). pp. 87-95.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

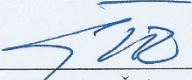
Vedoucí diplomové práce: **doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.**

Datum zadání: 29.02.2016

Datum odevzdání: 30.11.2016


doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- беру на ведо́мí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- было́ с́е́днано, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было́ с́е́днано, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ведо́мí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

Anotace

Diplomová práce pojednává o součiniteli relaxace (β -součiniteli) vycházejícího z metody redukce napětí (tzv. β -metody) pro deformační odezvu prostorového systému „ostění-hornina“ na základě rovinného matematického modelu. Konkrétně je diplomová práce zaměřena na vyhodnocení průběhu svislých posunů stropu v podélné ose tunelu. V práci je popsána problematika deformací při ražení podzemních děl, tvorba matematických modelů, redukce prostorového působení na model rovinný a samozřejmě stanovení součinitele relaxace, o kterém tato práce pojednává. Závislost velikosti svislého posunu stropu v různé vzdálenosti od čelby na velikosti součinitele relaxace je vyjádřena jak pro dílo bez ostění, tak zajištěné ostěním až k čelbě nebo s ostěním až od určité vzdálenosti od čelby. Výsledné průběhy součinitelů relaxace jsou vždy vyjádřené pomocí regresních funkcí, díky nimž je umožněn snadný přepočet svislých posunů stropu v tunelovém díle.

Klíčová slova: tunel, svislé posuny v podélném směru, konvergence, součinitel relaxace, β -metoda

Annotation

The thesis discusses about a relaxation coefficient (β -coefficient) which come out from load reduction method (known as a β -method) for a deformation feedback spatial systems „support-rock“ on the basis of 2D plane-strain model. The thesis is especially focused on an evaluation of longitudinal displacement profile of ceiling in the tunnel. In this paper work are described problems of deformation during excavation underground structures, creation of mathematical models, reduction a 3D effect on a model of 2D model and of course, specification of a relaxation coefficient, about which this thesis discusses. Relation between a size of vertical displacement ceiling in a different distance from face and size of relaxation coefficient is expressed both for structure without support, and for structure with support up to face or structure with support up to certain distance from face. Consequent relations of a relaxation coefficient are always expressed through the regression function, by which is enable easy conversion of vertical displacement ceiling in tunnel.

Key words: tunnel, longitudinal displacement, convergence, relaxation coefficient, β -method

Obsah diplomové práce

Seznam použitého značení	7
1. Úvod	8
2. Princip β -metody, přístupy ke kvantifikaci součinitele relaxace	9
2.1 Uvedení do problematiky deformací	9
2.2 Zásady navrhování podzemních staveb	10
2.2.1 Metoda mezních stavů	10
2.2.2 Posouzení EN 1997	11
2.3 Tvorba matematických modelů	13
2.3.1 Metoda konečných prvků	13
2.3.2 Volba konstitutivního modelu	14
2.4 Redukce prostorového působení na rovinný model	15
2.4.1 Gap model	16
2.4.2 Metoda změkčení jádra	17
2.4.3 Metoda redukce napětí (β -metoda)	18
3. Stanovení součinitele relaxace srovnáním rovinného a prostorového numerického modelu tunelu	20
3.1 Návrh vstupních parametrů modelové analýzy	20
3.2 Výpočet vývoje posunů ve směru podélné osy tunelu nezajištěného ostěním	22
3.2.1 Lineárně pružný model deformačního chování nezajištěného díla	22
3.2.2 Pružně-ideálně plastický (Mohr-Coulomb) model deformačního chování nezajištěného díla	27
3.2.3 Stanovení součinitele uvolnění napětí λ_d^*	29
3.3 Výpočet vývoje posunů ve směru podélné osy tunelu zajištěného ostěním	30
3.3.1 Obecně	30
3.3.2 Fenner-Pacherova křivka	30
3.3.3 Ostění tunelu	31
3.3.4 Lineárně pružný model deformačního chování zajištěného díla	33
3.4 Stanovení součinitele relaxace (β -součinitele)	35
3.4.1 Dílo nezajištěné (resp. zajištěné ostěním) až k čelbě	35
3.4.2 Dílo zajištěné ostěním od určité vzdálenosti od čelby	38
4. Srovnání hodnot součinitele relaxace získaného variantními přístupy	49
5. Závěr	52
6. Seznam použitých pramenů	55

Seznam použitého značení

A	plocha výrubu [m^2]
E	modul pružnosti [MPa]
E_{cm}	střední hodnota modulu pružnosti betonu [GPa]
G	smykový modul pružnosti [MPa]
K	součinitel bočního tlaku [-]
c_{ef}	efektivní soudržnost [kPa]
h	výška nadloží [m]
r_i	poloměr tunelového díla [m]
l	délka tunelového díla [m]
t_c	tloušťka ostění [m]
u_{max}	maximální radiální posun stropu tunelu [m]
u_r	radiální posun stropu tunelu v určité vzdálenosti od čelby [m]
x	vzdálenost od čelby [m]
β -součinitel	součinitel relaxace vycházející z β -metody [-]
γ	objemová tíha [kN/m^3]
γ_u	součinitel podmínek působení dle ČSN 73 7501 [-]
ε_z	relativní deformace ve směru osy z [-]
λ_d	součinitel uvolnění napětí [-]
λ_d^*	součinitel uvolnění napětí vycházející z vlastních numerických prostorových modelů [-]
σ_z	normálové napětí ve směru osy z [kPa]
ν	Poissonovo číslo [-]
φ_{ef}	efektivní úhel vnitřního tření [$^\circ$]
ψ	úhel dilatance [$^\circ$]

1. Úvod

Tato diplomová práce se zabývá stanovením součinitele relaxace β -metodou pro odvození průběhu svislých posunů stropu v podélné ose tunelu vycházejícího z výpočtů prostorového (3D) matematického modelu a odpovídajících modelů rovinných (2D). Díky tomuto součiniteli stačí pro vyjádření průběhu svislých posunů stropu díla spočítat pouze radiální posun rovinného matematického modelu stropu díla při zohlednění různých zatěžovacích stavů v jednotlivých fázích výpočtu. Z důvodu větší pracnosti a časové náročnosti prostorových modelů je snahou nahradit modely prostorové modely rovinnými, což však nelze provést ve všech případech. Základní podmínkou pro zjednodušení prostorového modelu na model rovinný je splnění podmínky rovinného přetvoření, která však není splněna např. v blízkosti čelby, případně u složitých prostorových úloh (např. při křížení tunelů).

V oblasti čelby tunelu dochází při ražení k prostorovým změnám napjatosti. Obecně může docházet, mimo jiné, k deformaci čelby tunelu do volného již vyraženého prostoru a není zde splněna podmínka rovinné deformace.

Cílem této práce je dosažení dle dále uvedeného relaxačního součinitele možnost stanovit vliv čelby na velikost a průběh svislých posunů na obryse podzemního díla s využitím pouze rovinného modelu.

Diplomová práce je rozdělena na část teoretickou a praktickou. Teoretická část pojednává o deformacích při ražení podzemních děl a hlavních faktorech, které ovlivňují jejich velikost. Dále pak obsahuje vysvětlení základních pojmů týkajících se tvorby matematických modelů, metody konečných prvků, navrhování podzemních staveb a volby konstitutivních modelů. Poté následuje, pro tuto práci, jedna z nejdůležitějších pasáží teoretické části a to podkapitola o metodách redukujících prostorové působení napětí na rovinné modely. Zde je uvedena metoda redukce napětí (tzv. β -metoda), z které vychází relaxační součinitel β . Třetí kapitola obsahuje praktickou část této práce. Jsou v ní stanoveny hodnoty součinitele relaxace na základě porovnávání svislých posunů stropu prostorových a rovinných matematických modelů. Hodnoty součinitele relaxace byly získány pro tunelové dílo bez ostění, resp. zajištěné ostěním. V čtvrté kapitole je srovnání dosažených výsledků součinitele relaxace a závěr obsahuje celkové shrnutí této diplomové práce.

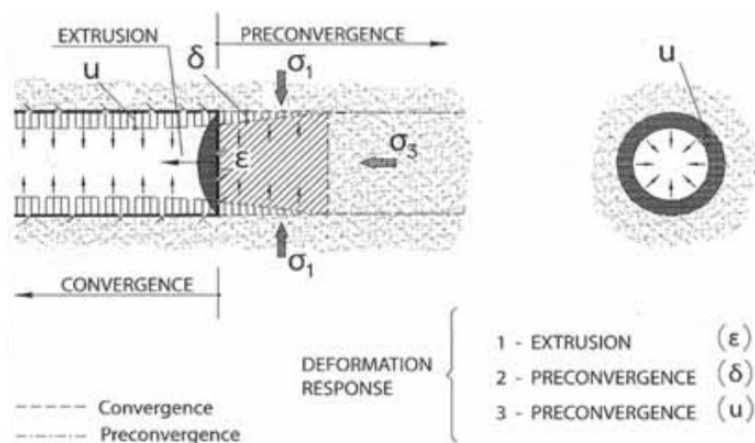
2. Princip β -metody, přístupy ke kvantifikaci součinitele relaxace

2.1 Uvedení do problematiky deformací

Stanovení deformací je základním, avšak obtížným geotechnickým úkolem při návrhu podzemní stavby. *Vyrubání štoly resp. tunelu v horninovém masivu je vážným zásahem do jeho rovnovážného stavu, kterým se podstatně změní napjatost v okolí výrubu. Síly, které přenášela hornina odstraněná z prostoru výrubu, se musí rozložit do jeho okolí, přičemž se výrub více či méně deformuje [2].* Při ražení podzemního díla dochází k prostorovým změnám napjatosti zvláště v blízkosti čelby. *Ve snaze o dosažení rovnovážného stavu dochází k přeskupování napětí v podélném i příčném směru. Detailní posouzení této skutečnosti vyžaduje použití prostorového matematického modelu [2].* Každý nový dílčí výrub způsobuje přemístění napjatosti v horninovém masivu.

Hlavními faktory ovlivňující deformační chování horninového masivu jsou velikost primární napjatosti, velikost a tvar díla, deformační a pevnostní charakteristiky masivu, směr ražení vzhledem k diskontinuitám a charakteristiky ostění díla.

Při ražbě podzemního díla dochází k vodorovné deformaci čelby (extruzi), deformaci horninového masivu před čelbou (prekonvergenci) a příčné deformaci tunelu (konvergenci), jak můžeme vidět na Obr. 1. Tyto deformace jsou na sebe navzájem závislé.



Obr. 1 Deformační odezva horniny při ražbě [1]

Při ražení ve složitých geologických podmínkách patří mezi hlavní problémy krátkodobá stabilita celého výrubu. S narůstající hloubkou uložení podzemního díla narůstá tlak horniny a s ním spojená **konvergence výrubu**. Ta může způsobit velké problémy. *Je žádoucí, aby se velikosti konvergence reálně prognózovaly už v rámci průzkumu [2].*

Určení konvergence je zvláště důležité v tlačivých horninách při ražení TBM (Tunnel Boring Machine – metoda razícího štítu) z důvodu eliminace sevření stroje. V silně konvergentních horninách se v určité vzdálenosti od čelby používá pouze poddajné ostění (např. kotvení stropu sítěmi a stříkaným betonem), které omezí vypadávání horniny a zamezí sevření pláště TBM komplexu při jeho nasazení. Toto poddajné ostění se poté zesílí v potřebném rozsahu. *Pokud se tunel razí pod velmi vysokým nadložím (vyšším než 500 m) je nárůst konvergencí většinou pomalý, plynulý [2].* Doporučuje se umožnit masivu určitou konvergenci a tím předejít potřebě dimenzovat ostění tunelu na tlaky, které se v dané hloubce vyskytují (viz kapitola 3.3). Stanovení konvergencí je důležité také u tunelů s nízkým nadložím pokud ovlivněná oblast zasahuje do zastavěného území nebo v případě, že jsou v nadloží situovány inženýrské sítě citlivé na poklesy.

Deformace podléhají navrženým přípustným mezím a při jejich překročení je nutné přistoupit k jejich eliminaci. Používá se řada technik od členění výrubu, ponechání horninového klínu, předstihového zajišťování (např. jehlování, mikropilotové deštníky, zlepšování horninového prostředí injektováním, kotvení čelby pomocí vodorovných kotev) až po zlepšování vlastností horninového masivu. Tuhost čelby tunelu je velice důležitá pro stabilitu podzemního díla.

Při monitoringu deformačního chování čelbového jádra zjistil prof. P. Lunardi, že objem horniny ovlivněný extruzí v podélném směru je přibližně roven objemu horniny ovlivněnému prekonvergencí do budoucího výrubu v příčném směru [1]. Obdobný předpoklad platí pro objem poklesové kotliny na povrchu terénu a zmenšení plochy výrubu tunelu v důsledku jeho konvergence. Bylo zjištěno, že deformace před čelbou dosahují přibližně 30 – 50 % celkových deformací.

2.2 Zásady navrhování podzemních staveb

Navrhování podzemních staveb se provádí podle:

- metody mezních stavů
- posouzení EN 1997.

2.2.1 Metoda mezních stavů

Konstrukce ztrácí spolehlivost, jestliže překročí některý z mezních stavů (mezní stav únosnosti, mezní stav použitelnosti). Mezní stavy se ověřují výpočtem, přijetím předepsaných opatření, observační metodou nebo experimentálními modely.

Výpočtem první skupiny mezních stavů (**mezního stavu únosnosti**) se prokazuje, že ostění je při spolupůsobení s horninovým masivem dostatečně únosné a stabilní a zajišťuje trvalou stabilitu výrubu [3]. Při tomto výpočtu se hodnoty normových pevností materiálu ostění dělí hodnotou součinitele podmínek působení γ_u . Tento součinitel závisí na způsobu rozpojování horniny, typu horniny, typu ostění a technologii ražby (viz Tabulka 1).

Typ ostění	γ_u
Pro monolitická ostění (včetně ostění ze stříkaného betonu) ve skalních horninách při použití razicího stroje na rozpojování bez použití trhavin, má-li zabezpečeno vedení rozpojovacích nástrojů po navrhovaném obrysu výrubu	1,00
Pro monolitická ostění (včetně ostění ze stříkaného betonu) ve skalních horninách při použití razicího stroje s rozpojovací hlavou na výložníku bez zabezpečeného vedení hlavy po navrhovaném obrysu výrubu	1,05
Pro monolitická ostění (včetně ostění ze stříkaného betonu) ve skalních horninách, rozpojuje-li se hornina pomocí trhavin	1,10
Pro monolitická ostění (včetně ostění ze stříkaného betonu) v zeminách	1,10
Pro montovaná ostění ve všech horninách a bez ohledu na způsob ražení	1,00
Pro výpočet spár montovaného ostění	1,10

Tabulka 1 Hodnoty součinitele podmínek působení γ_u podle ČSN 73 7501 [3]

Výpočtem druhé skupiny mezních stavů (**mezního stavu použitelnosti**) získáváme velikost přetvoření nadloží nebo ostění, poklesy povrchu území a také vznik a vývoj trhlin. Dle druhého mezního stavu se dokazuje, že vzniklé deformace nepřekročí stanovené limitní hodnoty, které by vedly k porušení bezproblémového provozu díla.

2.2.2 Posouzení EN 1997

Postupuje se v zásadě dle metody mezních stavů, avšak v závislosti na zvoleném **Návrhovém přístupu** jsou do výpočtu zavedeny **dílčí součinitele**, které upravují charakteristické hodnoty zatížení nebo účinků zatížení (A), parametrů zemin (M) nebo odporu materiálu (R). Hodnoty dílčích součinitelů závisí na aplikovaném návrhovém přístupu a typu řešené geotechnické úlohy. Jelikož jednotlivé návrhové přístupy uplatňují dílčí součinitele rozdílně, získané výsledky úloh se liší. *Pokud není v Národní příloze uveden pro danou geotechnickou úlohu doporučený Návrhový přístup, zůstává výběr Návrhové přístupu na projektantovi* [9].

Návrhový přístup 1 (součinitelé se použijí na zatížení a materiálové charakteristiky)

- kombinace 1: $A1 + M1 + R1$
- kombinace 2: $A2 + M2 + R1$

Návrhový přístup 2 (součinitelé se použijí na zatížení a odpor materiálu)

- kombinace: $A1 + M1 + R2$

Návrhový přístup 3 (součinitelé se použijí na zatížení a současně materiálové charakteristiky)

- kombinace: $(A1^* \text{ nebo } A2') + M2 + R3$

$A1^*$ na zatížení konstrukce

$A2'$ na geotechnická zatížení

Zatížení		Značka	Soubor	
			A1	A2
Stálé	Nepříznivé	γ_G	1,35	1,0
	Příznivé		1,0	1,0
Proměnné	Nepříznivé	γ_Q	1,5	1,3
	Příznivé		0	0

Tabulka 2 Hodnoty dílčích součinitelů pro zatížení nebo účinky zatížení [10]

Parametr zeminy	Značka	Soubor	
		M1	M2
Úhel vnitřního tření ^a	$\gamma_{\phi'}$	1,0	1,25
Efektivní soudržnost	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Neodvodněná smyková pevnost	γ_{cu}	1,0	1,4
Pevnost v prostém tlaku	γ_{qu}	1,0	1,4
Objemová tíha	γ_y	1,0	1,0
^a Tento součinitel se použije pro $\tan \phi'$			

Tabulka 3 Hodnoty dílčích součinitelů pro parametry zeminy [10]

	Značka	Soubor		
		R1	R2	R3
Únosnost	$\gamma_{R,v}$	1,0	1,4	1,0
Usmyknutí	$\gamma_{R,h}$	1,0	1,1	1,0

Tabulka 4 Hodnoty dílčích součinitelů pro odpor materiálu (únosnost) [10]

Při analýze tunelu je jedním z rozhodujících faktorů **velikost primární napjatosti**. Rozložení vertikálního a horizontálního totálního napětí je dáno tíhou zeminy, hloubkou pod povrchem, tlakem vody v pórech a součinitelem bočního tlaku v klidu K_0 .

Dalším důležitým krokem, který je potřeba vzít v úvahu, je simulace dřívějších stavebních činností, ke kterým došlo v okolí místa ražby, jako jsou například výkopové práce nebo dřívější stavební činnost. Tento krok však můžeme zanedbat, pokud předchozí činnosti měly minimální vliv na horninový masiv.

2.3 Tvorba matematických modelů

Svislé posuny v podélném směru, jejich průběh a z nich vyplývající součinitel relaxace β byl zkoumán na liniovém podzemním díle, a to jak pro výrub nezajištěný, tak zajištěný ostěním. Pro výpočet posunů byla použita metoda konečných prvků. Výsledky posunů u nezajištěného díla byly navíc porovnány s dostupnými analytickými vztahy.

2.3.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP) patří mezi metody numerické (přibližné). Dochází při ní k rozdělení (diskretizaci) vyšetřované oblasti (v našem případě horninového masivu a konstrukce ostění) na síť konečných prvků s příslušnými materiálovými a geometrickými vlastnostmi. Tyto prvky jsou tvořeny jednoduchými tvary, které jsou vzájemně spojeny uzly, pomocí kterých prvky navzájem komunikují. Prvky mohou být první, druhé nebo třetí dimenze (viz Obr. 2). Diskretizace oblasti má velký vliv na výsledky. Čím bude síť konečných prvků jemnější, tím přesnější výsledky dostaneme, avšak výpočet bude časově i kapacitně náročnější. V rovině je nejčastěji síť konečných prvků tvořena trojúhelníky nebo čtyřúhelníky s uzly umístěnými ve vrcholech, středu stran, popřípadě i uvnitř prvku. Počet uzlů závisí na typu řešené úlohy (např. u výpočtu stability se doporučuje jejich vyšší počet). V rovině má každý uzel dva stupně volnosti (dva posuny) a v prostoru šest stupňů volnosti (tři posuny a tři natočení).



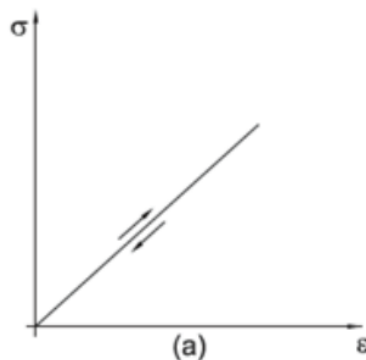
Obr. 2 Typické tvary konečných prvků [7]

Po rozdělení oblasti následuje analýza jednotlivých konečných prvků a poté analýza celé oblasti. *Výsledkem řešení jsou primárně hodnoty hledané funkce* (u MKP posuny) *v diskrétních bodech oblasti* [5]. Široké aplikační možnosti metody konečných prvků využívají inženýři a vědci již přibližně šest desetiletí. Její počátek v inženýrské aplikaci je spjat s leteckým průmyslem a s rozvojem výpočetní techniky se začala brzy aplikovat i v dalších inženýrských oblastech, včetně geotechniky a podzemního stavitelství. Při návrhu velikosti modelu je třeba zvláště respektovat vzdálenost hranice modelu z důvodu eliminace ovlivnění výsledků výpočtu okrajovými podmínkami modelu.

Pro výpočet rovinných i prostorových modelů metodou konečných prvků byl využit software **MIDAS GTS NX** (verze 2016 2.1). Tento software umožňuje výpočet mnoha geotechnických úkolů, jako např. komplexních tunelových systémů, výkopů, pažicích stěn, opěrných zdí, základů, hrází, stability svahů a také výpočet dynamických úloh.

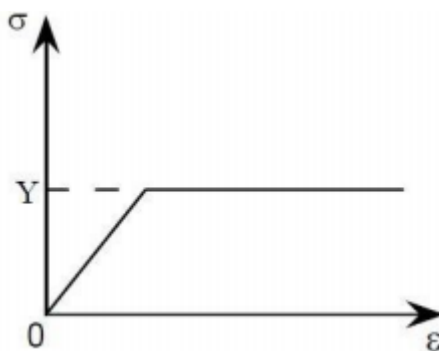
2.3.2 Volba konstitutivního modelu

Nejdůležitějším a zároveň nejtěžším na tvorbě matematického modelu je výběr správného konstitutivního materiálového modelu, který obecně popisuje vztah mezi napětím a přetvořením pro daný horninový materiál. To znamená, že se snaží popsat chování zeminy, resp. horniny. Ve výpočtech pro tuto diplomovou práci byl použit **lineárně pružný** a **pružně-ideálně plastický (Mohr-Coulomb)** model. U lineárně pružného modelu platí lineární vztah mezi napětím a přetvořením daný Hookovým zákonem. Mezi materiálové charakteristiky zde patří modul pružnosti E (resp. smykový modul pružnosti G) a Poissonovo číslo ν .



Obr. 3 Lineárně pružný model [4]

U ideálně plastického modelu se předpokládá rozdělení deformací na pružnou (vratnou) a plastickou (nevratnou) složku [4]. Pružně-ideálně plastický model (Mohr-Coulomb) se chová pružně až do meze plasticity (bod Y na Obr. 4), poté vznikají plastická přetvoření při konstantním napětí [4]. Mezi materiálové charakteristiky zde patří modul pružnosti E , Poissonovo číslo ν , soudržnost c , úhel vnitřního tření φ a úhel dilatance ψ , který udává velikost plastické objemové expanze.

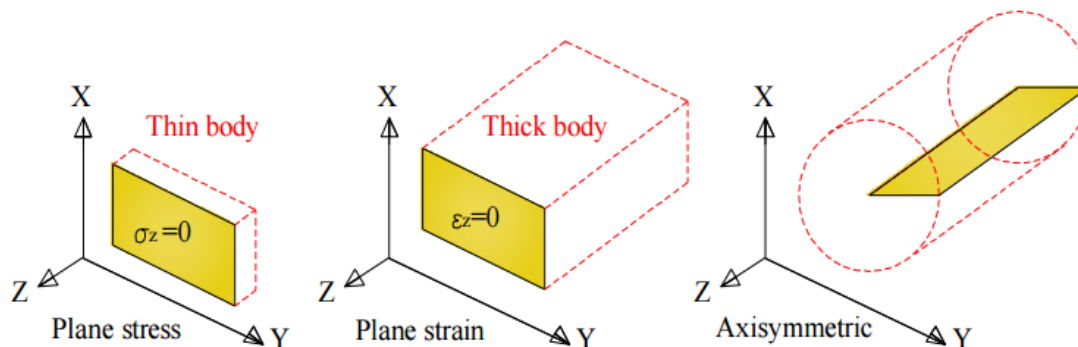


Obr. 4 Pružně-ideálně plastický model [8]

2.4 Redukce prostorového působení na rovinný model

Průběh napětí na postupující čelbě je prostorovým problémem složitým k výpočtu. Redukce prostorového modelu tunelu na model rovinný, může být počítán za předpokladu rovinné napjatosti, rovinné deformace nebo osově symetrické napjatosti v závislosti na požadovaných objektivních podmínkách výpočtu (viz Obr. 5). Při rovinné napjatosti leží všechna napětí v jedné rovině. Pokud uvažujeme nulové napětí ve směru osy z ($\sigma_z = 0$), relativní deformace ve směru této osy nulová není ($\epsilon_z \neq 0$). Při použití přístupu rovinné deformace musí být splněna podmínka rovinného přetvoření ($\epsilon_z = 0$), tj. konstrukce tunelu se nemůže volně deformovat ve směru osy z (nelze splnit v blízkosti čelby). Normálové napětí ve směru osy z je v tomto případě nenulové ($\sigma_z \neq 0$). Tento přístup se používá u úloh, kde je tvar konstrukce a působící zatížení stejné po délce.

Osově symetrickou napjatost lze uvažovat při osově symetrické geometrii díla, symetrickém zatížení nebo osově symetrické geologii horninového masivu. Tento přístup se používá například pro výpočet zatěžovacích zkoušek jednotlivých pilot, kotev nebo kruhových základů.



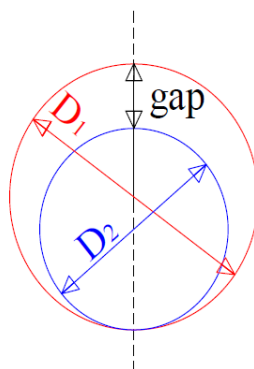
Obr. 5 Přístupy rovinného modelování (rovinná napjatost, rovinná deformace, osově symetrická napjatost) [7]

Efekt prostorové redistribuce napětí lze simulovat za pomoci rovinného (2D) přístupu, avšak konečné hodnoty deformací jsou méně přesné než při výpočtu prostorového modelu. Ten je však mnohem náročnější jak pro modelování, tak samotné řešení, které může být provedeno pouze za použití numerických metod. Při redukci prostorového působení na rovinný model se pro simulaci třetího rozměru využívají následující metody:

- gap model
- metoda změkčení jádra
- **metoda redukce napětí – β metoda**

2.4.1 Gap model

Tato metoda byla představena v roce 1983 autorem Rowe a kolektivem. Předpokládá definovanou mezeru zahrnutou do sítě konečných prvků reprezentující deformace výrubu. Parametr této metody je funkcí prostorové deformace čelby tunelu, jeho geometrie apod. Velikost mezery závisí na technologii výstavby. Parametr mezery představuje vertikální rozdíl mezi průměrem díla v iniciačním stavu (D1 - před tunelováním) a stavu po provedení výrubu (D2). Užitečná metoda k predikování deformací při použití rovinných modelů nebo empirických vztahů.



Obr. 6 Gap model [7]

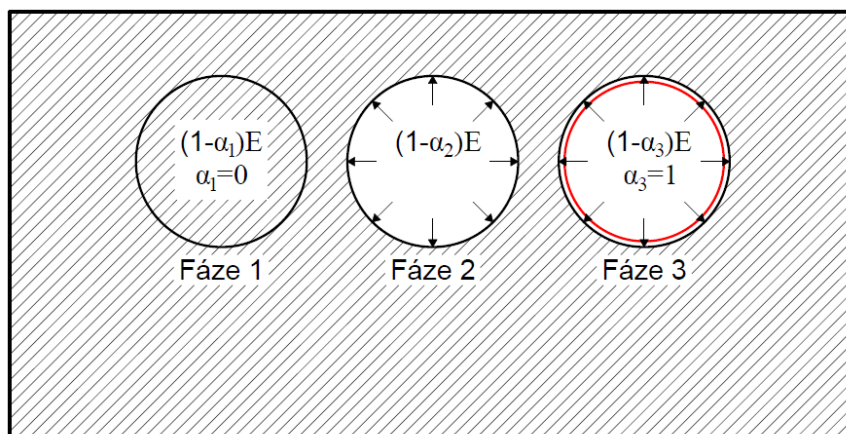
2.4.2 Metoda změkčení jádra

Metoda rovinné deformace modelující prostorové působení, u které dochází k postupnému snížení tuhosti horninového masivu v oblasti výrubu, zavedením součinitele α dle vztahu:

$$(1 - \alpha)E_{horniny} = E_{výrubu} \quad (1)$$

kde $E_{horniny}$ je modul pružnosti horninového masivu; $E_{výrubu}$ je modul pružnosti horninového masivu v oblasti výrubu; α je redukční součinitel.

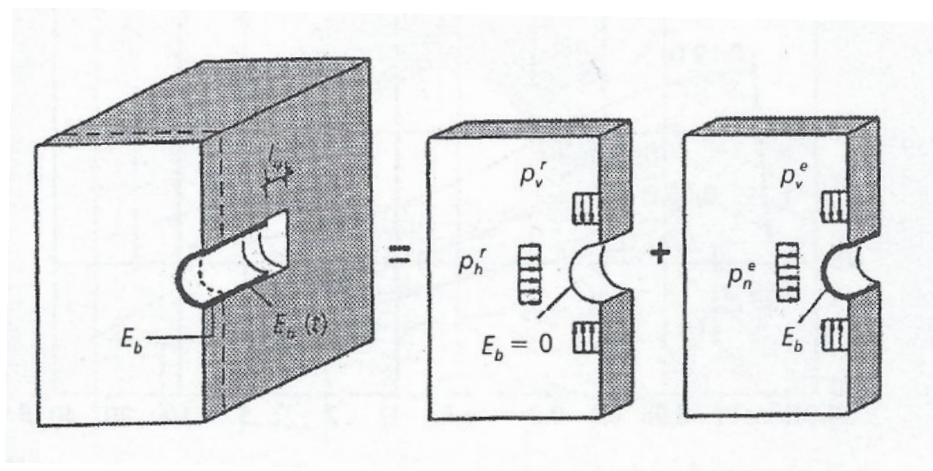
Redukční součinitel nabývá hodnot od $\alpha = 0$ (dílo před výrubem) do $\alpha = 1$ (vyražené dílo), čímž v rovinném modelu dochází k postupné redukci modulu pružnosti horninového masivu v oblasti výrubu a simulaci změny napjatosti (viz Obr. 7). Hodnota tohoto součinitele závisí na parametrech horniny, velikosti výrubu apod.



Obr. 7 Redukce tuhosti horninového masivu v oblasti výrubu

2.4.3 Metoda redukce napětí (β -metoda)

Způsob modelování prostorové napjatosti pomocí rovinného matematického modelu. Podobná metodě předchozí. U této metody však dochází k postupné redukci primární napjatosti. Primární napětí je v rovinném modelu rozděleno na dvě části (viz Obr. 8). Při výpočtu tunelového díla s ostěním se první část tohoto napětí aplikuje ihned po provedení výrubu a simuluje stav před zabudováním ostění. Druhá část primárního napětí již působí na systém ostění - hornina. V iniciační fázi (Fázi 1 na Obr. 9) je vnitřní tlak p_0 v místech budoucího výrubu shodný s vnějším horninovým tlakem. Vnitřní tlak je dále redukován bezrozměrným **součinitelem relaxace β** (β -součinitelem), který se může pohybovat v rozsahu od $\beta = 0$ (dílo před výrubem) do $\beta = 1$ (vyražené dílo).



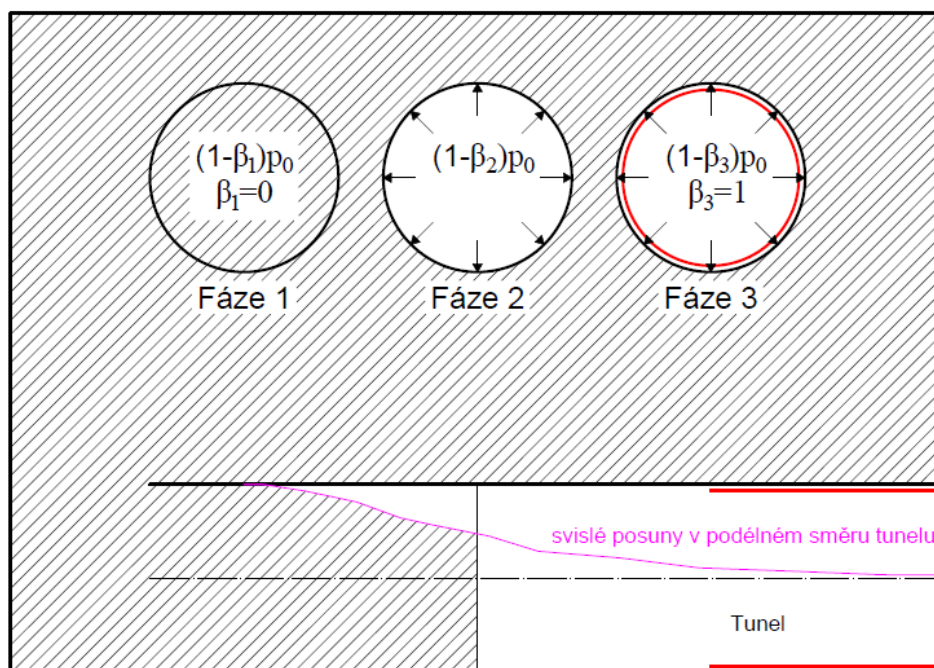
Obr. 8 Rozdělení primárního napětí do dvou částí při rovinném řešení β -metodou [2]

Cílem této metody je uvažování takové velikosti primární napjatosti horninového masivu, při které vyšetřovaný řez posuzovaný v rovinném modelu vyvolá stejné účinky, jaké jsou v daném místě vypočteny pro prostorový model.

Podélný řez na Obr. 9 představuje průběh svislých posunů stropu v podélné ose tunelu před a po instalaci ostění. Primární napětí v okolí budoucího výrubu se mění postupně s časem dle vzorce:

$$(1 - \beta)p_0 \quad (2)$$

kde β je součinitel relaxace, p_0 je vnitřní tlak odpovídající primární napjatosti.



Obr. 9 Princip β -metody

Hodnota součinitele relaxace β závisí na tvaru a velikosti výrubu, délce záběru a geologii horninového masivu. V této diplomové práci byl součinitel relaxace stanovován pro odvození svislých posunů stropu v podélné ose tunelu s využitím rovinného matematického modelu. Velikost součinitele relaxace byla určována jak pro dílo bez ostění, tak pro dílo zajištěné ostěním (viz kapitola 3.4.1). V kapitole 3.4.2 byl studován vliv instalace ostění od určité vzdálenosti od čelby na velikost součinitele relaxace.

3. Stanovení součinitele relaxace srovnáním rovinného a prostorového numerického modelu tunelu

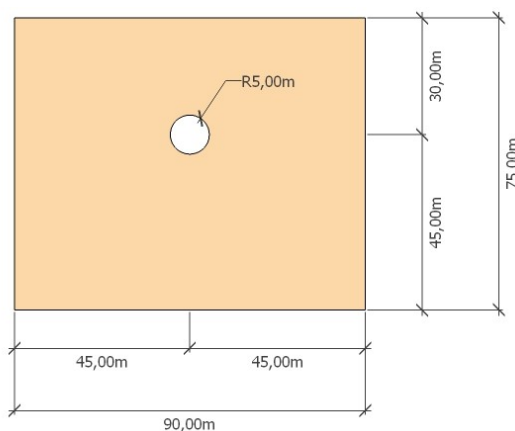
3.1 Návrh vstupních parametrů modelové analýzy

Výpočet průběhu svislých posunů v podélném směru byl zkoumán na tunelu kruhového průřezu o poloměru $r_i = 5$ m (plocha výrubu $A = 78,5$ m²). Charakteristika horninového masivu, do nějž bylo umístěno podzemní dílo, odpovídá dle ČSN EN ISO 14688 zemině **grSi** (štěrkovitá hlína) pevné konzistence. Geotechnické parametry tohoto horninového masivu jsou následující: modul pružnosti $E = 30$ MPa; objemová tíha $\gamma = 19$ kN/m³ (homogenní prostředí); Poissonovo číslo $\nu = 0,35$; efektivní soudržnost $c_{ef} = 32$ kPa a efektivní úhel vnitřního tření $\varphi_{ef} = 32^\circ$. Dílo bylo umístěno do zeminového prostředí z důvodu větších hodnot posunů a potřeby vyztužení díla. Schéma řešeného výpočtového rovinného a prostorového modelu je možno vidět na Obr. 10 a 11. U všech modelů má dílo výšku nadloží $h = 25$ m. Prostorový model má délku 90 m a navržené podzemní dílo je vyraženo do délky $l = 60$ m.

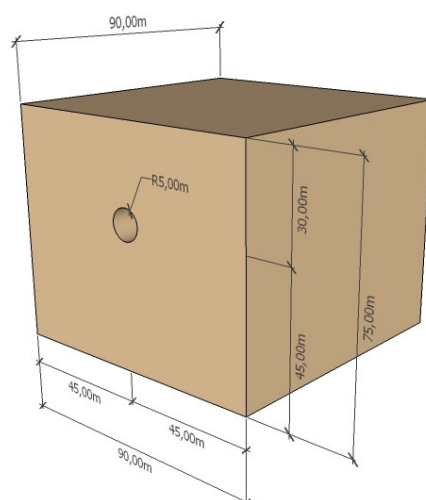
r_i [m]	γ [kN/m ³]	E [MPa]	h [m]	c_{ef} [kPa]	ν [-]	φ_{ef} [°]
5	19	30	25	32	0,35	32

Tabulka 5 Navržené fyzikální a mechanické parametry

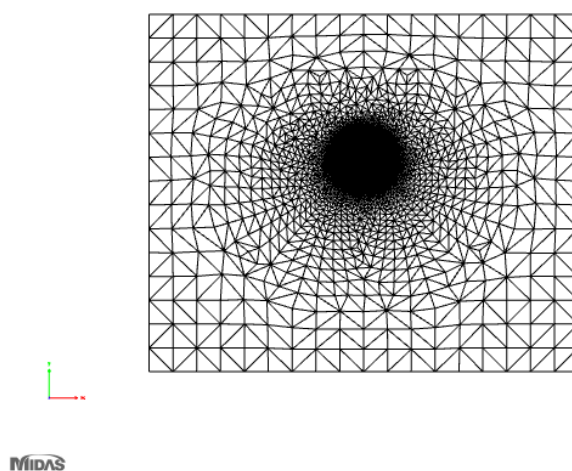
Při realizaci tunelů v geologickém prostředí složité stavby je pro průzkum nejlépe užít metodu průzkumné štoly. Na základě této průzkumné metody lze mimo jiné, pomocí metod geotechnického monitoringu, stanovit napět'o-deformační, popř. další projevy horninového masivu přímo in-situ a na základě metod zpětné analýzy pak objektivizovat vstupní data modelů.



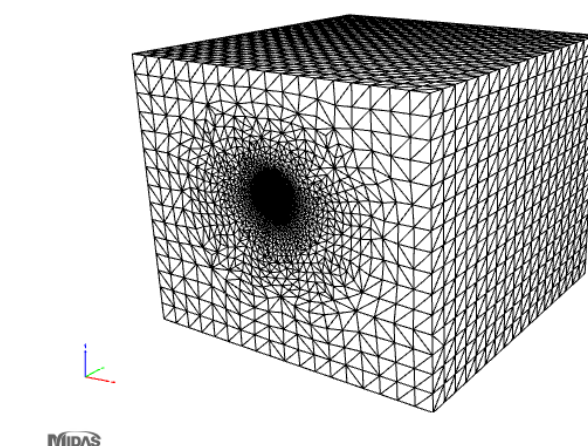
Obr. 10 Schéma výpočtového rovinného modelu



Obr. 11 Schéma výpočtového prostorového modelu



Obr. 12 Síť konečných prvků rovinného modelu



Obr. 13 Síť konečných prvků prostorového modelu

3.2 Výpočet vývoje posunů ve směru podélné osy tunelu nezajištěného ostěním

Byl proveden numerický výpočet rovinného i prostorového modelu tunelu metodou konečných prvků. Svislý posun byl vždy sledován na stropě díla. Při ražbě podzemního díla totiž obvykle dochází k sesuvu množství horniny právě ze stropu, z důvodu hmotnosti horniny a tahového (tangenciálního) napětí, které dosahuje vyšších hodnot a je generováno kolem obrysu výrubu. Přejít z triaxiální napjatosti do napjatosti biaxiální v důsledku uvolnění napětí po obvodu výrubu má za následek deformaci horniny. Uvažovaná hodnota součinitele bočního tlaku v modelu pro nezajištěné dílo byla rovna $K = 1$ (hodnota vertikálního i horizontálního primárního napětí je stejná). Důvodem tohoto předpokladu je možnost porovnání výsledků numerického modelu s výsledky zjednodušených analytických postupů, které z tohoto předpokladu vycházejí.

Pro analytické řešení byla využita metoda convergence-confinement a její součinitel uvolnění napětí λ_d . Tato metoda slouží k určení posunů v tunelu s ohledem na efekt uvolnění napětí a interakci mezi ostěním tunelu a obklopující horninou. Metoda byla aplikována pro vtažnou štolu Ban Ve vodní elektrárny v provincii Nghe An ve Vietnamu [6].

Výpočet rovinného i prostorového modelu nezajištěného tunelového díla byl rozdělen do dvou fází:

1. fáze Iniciační fáze
Výpočet primární (geostatické) napjatosti horninového masivu představující počáteční stav před provedením výrubu.
2. fáze Výrub tunelu
Vyražení tunelu v masivu. Tím dochází k odlehčení, změně stavu primární napjatosti a k nastolení sekundárního stavu rovnováhy odpovídající relaxaci horninového masivu. Míra relaxace je v případě rovinného modelu nastavena v jednotlivých fázích pomocí relaxačního součinitele β (relaxace napětí).

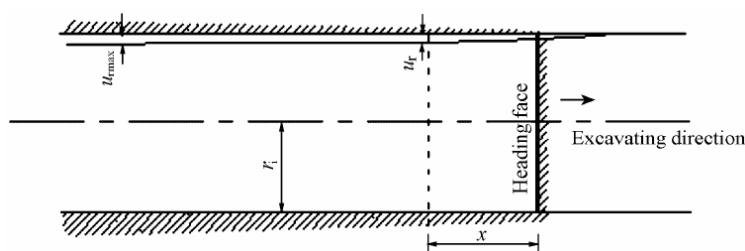
3.2.1 Lineárně pružný model deformačního chování nezajištěného díla

V grafu č. 2 můžeme vidět průběh svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu získaného z prostorového matematického modelu a průběhů odvozených z analytického řešení s využitím convergence-confinement metody. Pro ni byly využity vztahy autorů Paneta, Unclu a Gerceka, které uvažují pružné přetváření.

Panet (1995) určil vztah pro průběh svislých posunů stropu v podélném směru tunelu:

$$\lambda_d = \frac{u_r}{u_{max}} = \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \left(1 - \left(\frac{3}{3 + 4x^*} \right)^2 \right) \quad (3)$$

kde $x^* = \frac{x}{r_i}$; x je vzdálenost od čelby; r_i je poloměr díla; u_r je radiální svislý posun stropu díla v určité vzdálenosti x od čelby; u_{max} je maximální radiální svislý posun stropu díla získaný z rovinného modelu; λ_d je součinitel uvolnění napětí.



Obr. 14 Profil radiálních svislých posunů stropu u_r - tunel nezajištěný ostěním [6]

Unclu a Gercek (2003) určili vztahy pro průběh svislých posunů stropu v podélném směru tunelu před a za čelbou pomocí rozdílných vztahů:

pro $x < 0$ (prekonvergence)

$$\lambda_d = \frac{u_r}{u_{max}} = u_0 + A_a (1 - e^{-B_a x^*}) \quad (4)$$

kde $u_0 = -A_a$; A_a , B_a jsou součinitelé závislé na velikosti Poissonova čísla horniny ν ; u_r je radiální svislý posun stropu díla v určité vzdálenosti x od čelby; u_{max} je maximální radiální svislý posun stropu díla získaný z rovinného modelu; $x^* = \frac{|x|}{r_i}$; x je vzdálenost od čelby; r_i je poloměr díla; λ_d je součinitel uvolnění napětí.

$$A_a = -0,22\nu - 0,19 \quad (5)$$

$$B_a = 0,73\nu + 0,81 \quad (6)$$

pro $x > 0$ (konvergence)

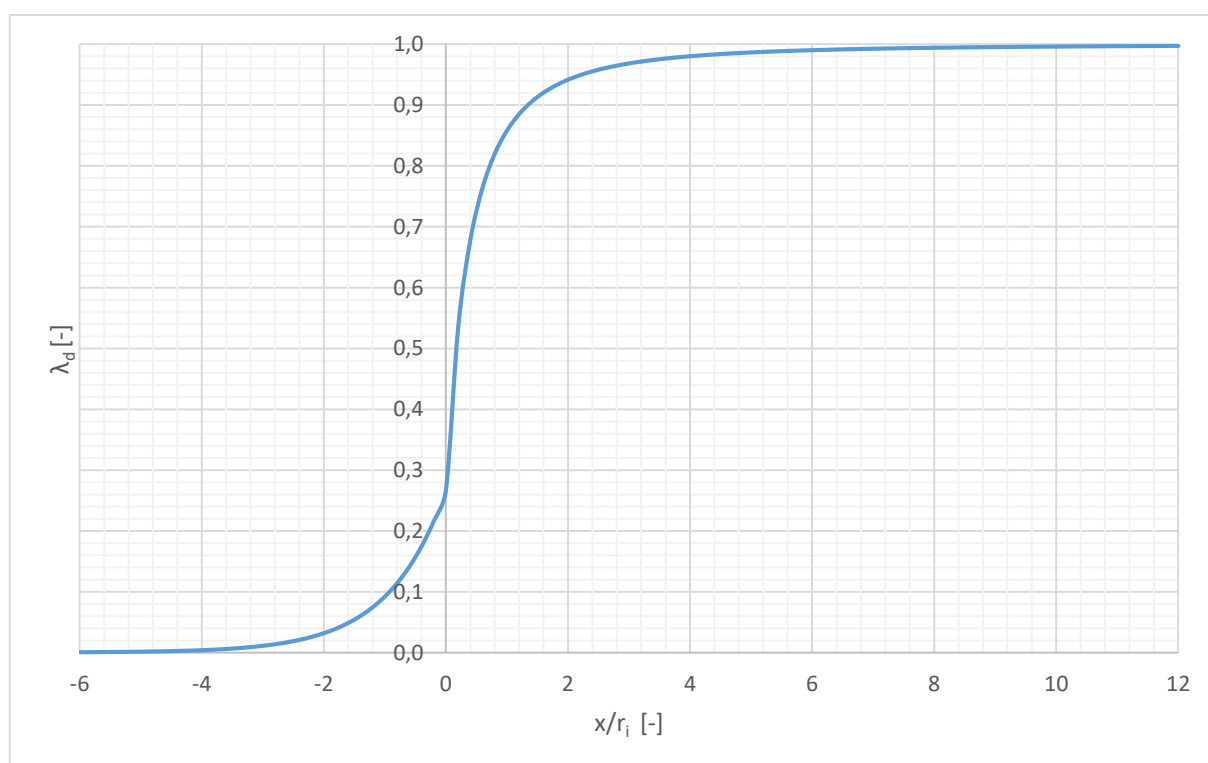
$$\lambda_d = \frac{u_r}{u_{max}} = u_0 + A_b \left(1 - \left(\frac{B_b}{B_b + x^*} \right)^2 \right) \quad (7)$$

kde $u_0 = 1 - A_b$; A_b , B_b jsou součinitele závislé na velikosti Poissonova čísla horniny ν ; u_r je radiální svislý posun stropu díla v určité vzdálenosti x od čelby; u_{max} je maximální radiální svislý posun stropu díla získaný z rovinného modelu; $x^* = \frac{|x|}{r_i}$; x je vzdálenost od čelby; r_i je poloměr díla; λ_d je součinitel uvolnění napětí.

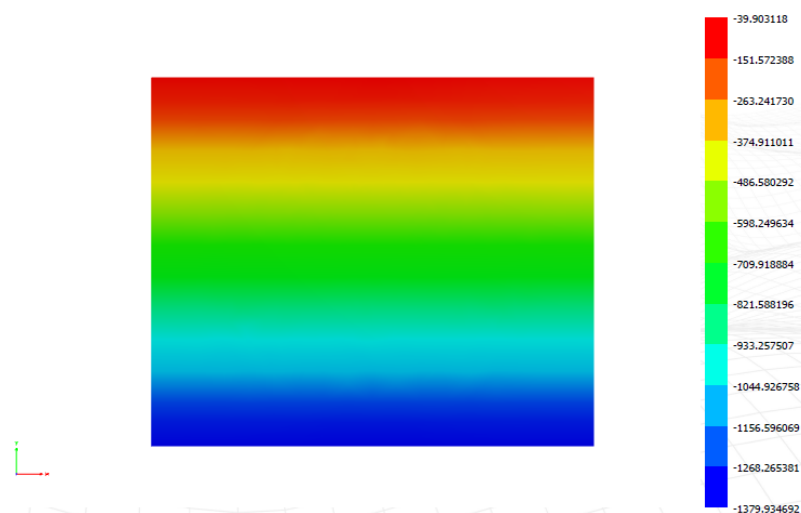
$$A_b = -0,22\nu + 0,81 \quad (8)$$

$$B_b = 0,39\nu + 0,65 \quad (9)$$

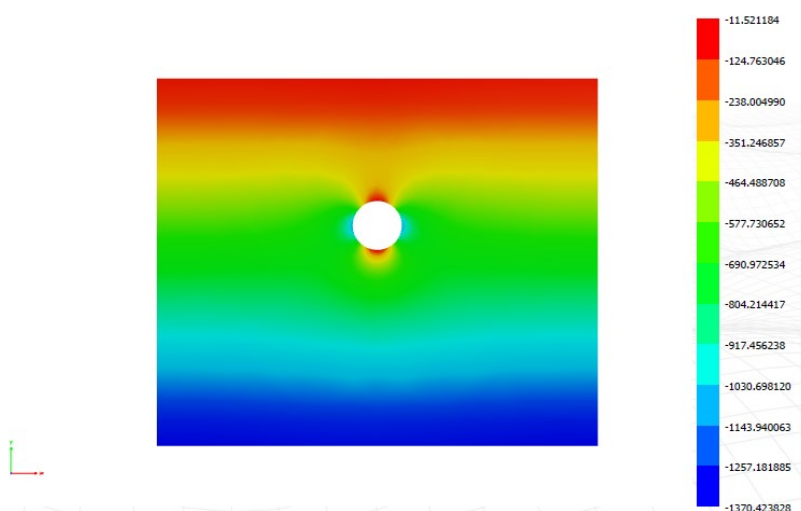
Pro tunelové dílo zadané geometrie obklopeného horninovým masivem s danými materiálovými charakteristikami byla závislost součinitele uvolnění napětí λ_d na poměru x/r_i (x je vzdálenost od čelby, r_i je poloměr díla) vykreslena do grafu č. 1. Tato závislost vychází z analytického řešení autorů Unclu a Gerceka.



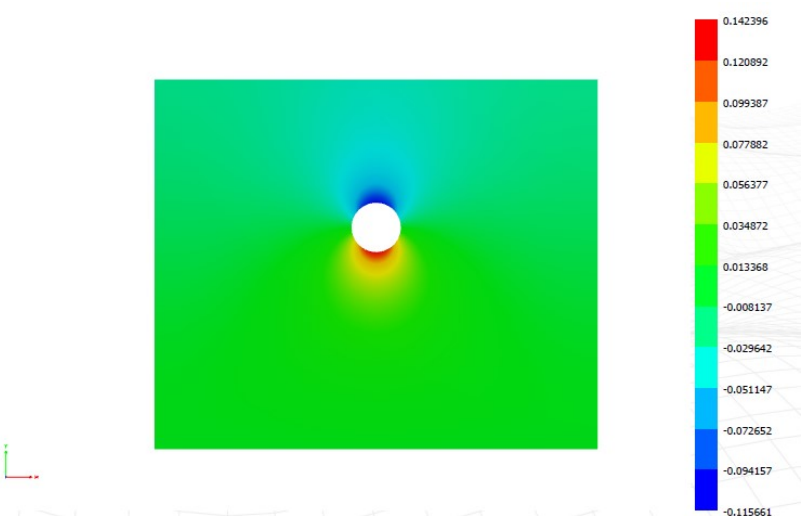
Graf č. 1 Součinitel uvolnění napětí λ_d na obrysu tunelu nezajištěného ostěním ve směru jeho podélné osy



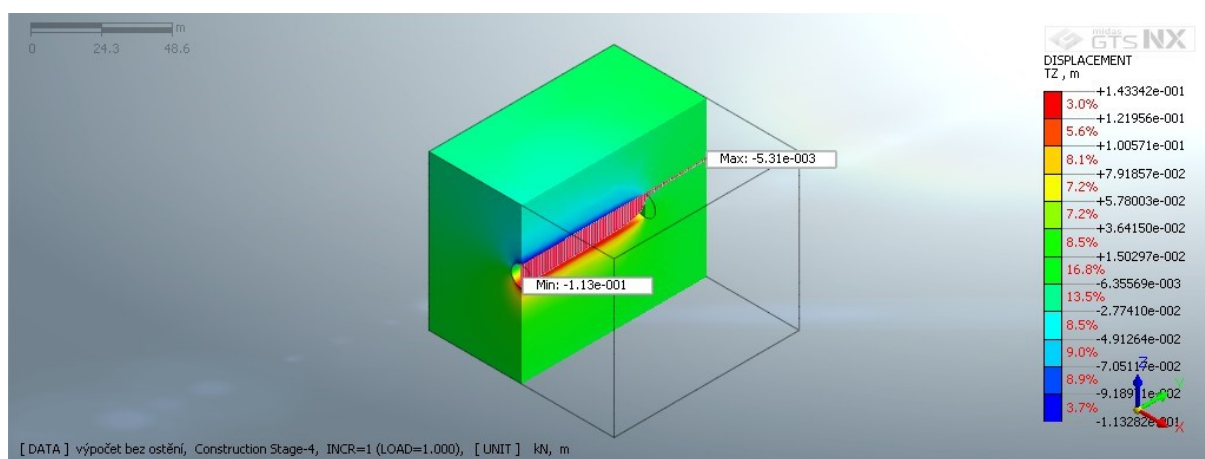
Obr. 15 Průběh svislého napětí σ_z před provedením výrubu



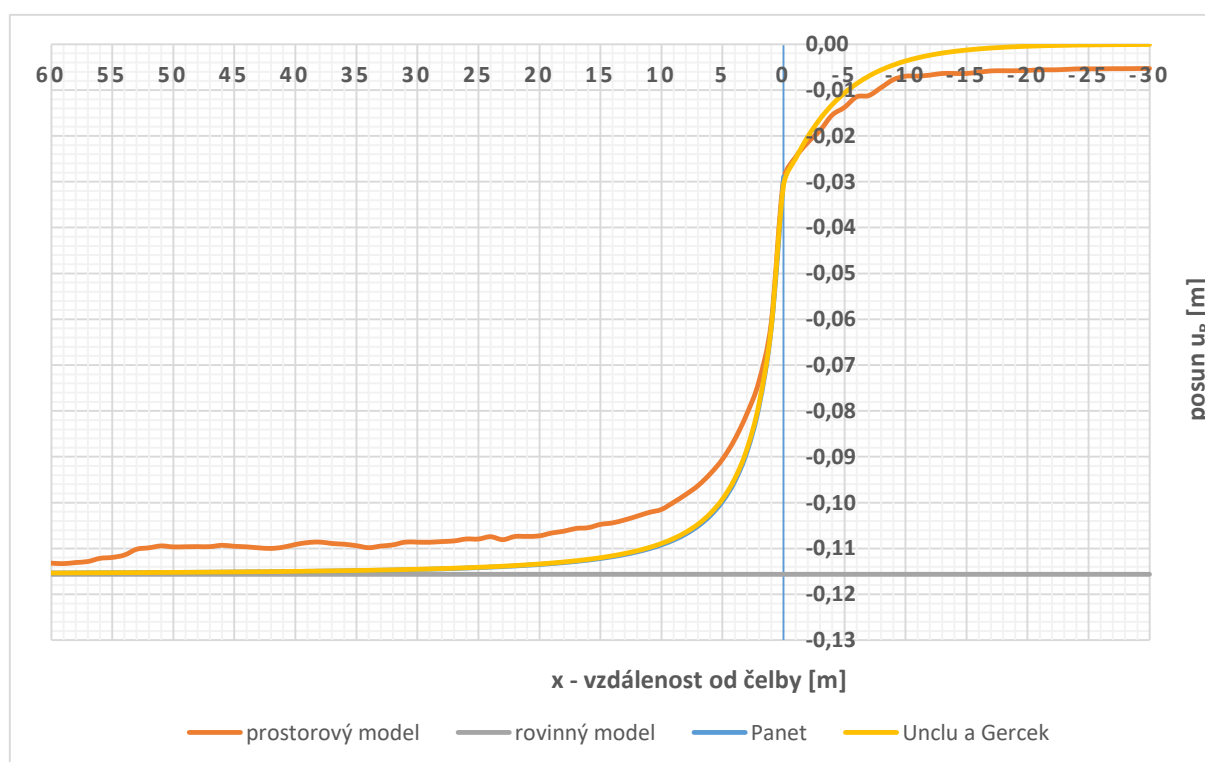
Obr. 16 Průběh svislého napětí σ_z po provedení výrubu



Obr. 17 Svislé posuny rovinného modelu – tunel bez ostění



Obr. 18 Průběh svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu prostorového matematického modelu získaný metodou konečných prvků pomocí softwaru MIDAS GTS NX - tunel bez ostění



Graf č. 2 Průběhy svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu vyplývající z numerického a analytického řešení v oboru pružného přetváření - tunel bez ostění

V grafu č. 2 vidíme, že hodnota radiálního posunu stropu díla rovinného modelu ($u_r = -1,16E-01$ m) je přibližně o 6 % větší než hodnota posunu získaného z modelu prostorového ($u_r = -1,09E-01$ m). U tohoto modelu bylo uvažováno, že maximální posun stropu byl ve vzdálenosti 30 m od čelby. Průběhy svislých posunů získaných z analytických řešení kopírují průběh svislých posunů z modelu prostorového, mají však v části před čelbou hodnotu větší a za čelbou hodnotu menší. Průběhy svislých posunů získané analytickými vztahy autorů Paneta a Unclu a Gerceka se v části před čelbou takřka shodují.

3.2.2 Pružně-ideálně plastický (Mohr-Coulomb) model deformačního chování nezajištěného díla

V reálných podmínkách nelze předpokládat pouze pružné chování horninového masivu, jelikož ten může při určité velikosti napětí vykazovat plastické přetváření.

Pro porovnání numerického modelu s analytickým řešením v oboru plastického přetváření byl využit vztah autorů Cherna a kolektivu z roku 1998. Tento vztah sestavili z naměřených hodnot svislých posunů v blízkosti čelby tunelu při realizaci projektu Mingtam Power Cavern na ostrově Tchaj-wan.

Horninový masiv s danými materiálovými vlastnostmi nedokázal v numerickém modelu s uvažováním plastického přetváření přenést posuny, které byly vypočteny. Proto, aby byl vykreslen průběh svislých posunů stropu a mohl být srovnán s analytickým řešením, úhel vnitřního tření byl navýšen o 6° , tzn. na hodnotu $\varphi = 38^\circ$. Porovnání analytického a numerického řešení můžeme vidět v grafu č. 3.

Chern a kolektiv (1998):

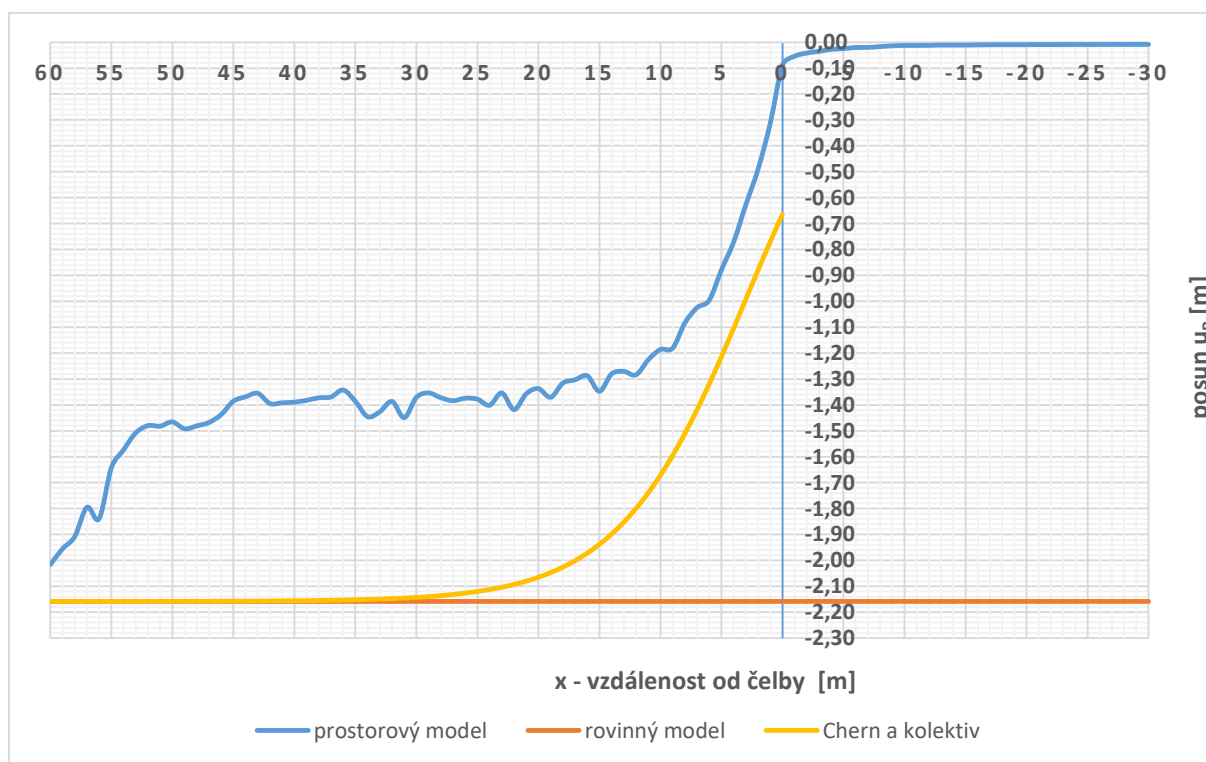
$$\lambda_d = \frac{u_r}{u_{max}} = \left(1 + e^{\left(\frac{-x^*}{1,10} \right)} \right)^{-1,70} \quad (10)$$

kde u_r je radiální svislý posun stropu díla v určité vzdálenosti x od čelby; u_{max} je maximální radiální svislý posun stropu díla získaný z rovinného modelu; $x^* = \frac{x}{r_i}$; x je vzdálenost od čelby; r_i je poloměr díla; e je Eulerovo číslo; λ_d je součinitel uvolnění napětí.

V grafu č. 3 vidíme výraznější rozdíl mezi analytickým a numerickým řešením než v oboru pružného přetváření. Vypočtený maximální ustálený radiální svislý posun stropu díla v rovinném modelu ($u_r = -2,16E+00$ m) je větší než posun vyplývající z modelu prostorového ($u_r = -1,38E+00$ m). U tohoto modelu bylo uvažováno, že maximální svislý posun stropu se nachází ve vzdálenosti 27 m od čelby.

Po vyhodnocení provedených numerických a analytických výpočtů vyplývá, že analytická řešení jsou zjednodušená vůči složitějším numerickým matematickým modelům a vůči skutečnému chování horninového masivu vůbec, jejich řešením však získáme základní představu o chování analyzovaného systému.

Convergence-confinement metoda a její součinitel uvolnění napětí λ_d je efektivní nástroj pro návrh vhodné doby zabudování ostění. Je však omezena na rovinný pružnoplastický model, hydrostatický počáteční stav (součinitel bočního tlaku $K = 1$) a kruhový průřez tunelu. Pro nekruhové průřezy a jiné konstitutivní modely je potřeba využití numerických metod modelování.



Graf č. 3 Průběh svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu vyplývající z numerického a analytického řešení v oboru plastického přetváření
- tunel bez ostění

3.2.3 Stanovení součinitele uvolnění napětí λ_d^*

Změnu napjatosti zejména v blízkosti čelby při ražení podzemního díla potvrzují i matematické modely vypočtené pro tuto práci. K tomuto potvrzení byl využit individuální součinitel uvolnění napětí λ_d^* . Ten vychází z numerických prostorových modelů a byl uvažován jako podíl svislého posunu stropu v určité vzdálenosti od čelby (u_r) dělený maximálním vypočteným svislým posunem stropu díla (u_{max}). Z porovnání tohoto součinitele v pružném a plastickém oboru přetváření plyne, že jejich rozdíl nabývá větší hodnoty právě v blízkosti čelby. Hodnoty svislých posunů tabulce č. 6 vyplývají z grafu č. 2 a 3.

součinitel uvolnění napětí λ_d^* :

$$\lambda_d^* = \frac{u_r}{u_{max}} \quad (11)$$

vzdálenost x od čelby [m]	pružný obor přetváření		plastický obor přetváření		Δ
	posun u_r [m]	součinitel λ_d^*	posun u_r [m]	součinitel λ_d^*	
30	-1,09E-01	1,000			
29	-1,09E-01	1,000			
28	-1,08E-01	0,999			
27	-1,08E-01	0,997	-1,38E+00	1,000	0,003
26	-1,08E-01	0,993	-1,37E+00	0,993	0,000
25	-1,08E-01	0,994	-1,38E+00	0,996	0,002
24	-1,07E-01	0,989	-1,40E+00	1,013	0,024
23	-1,08E-01	0,995	-1,35E+00	0,978	-0,017
22	-1,07E-01	0,988	-1,42E+00	1,025	0,036
21	-1,07E-01	0,988	-1,36E+00	0,981	-0,008
20	-1,07E-01	0,987	-1,34E+00	0,966	-0,021
19	-1,07E-01	0,981	-1,37E+00	0,990	0,009
18	-1,06E-01	0,978	-1,32E+00	0,951	-0,027
17	-1,06E-01	0,972	-1,30E+00	0,942	-0,031
16	-1,05E-01	0,971	-1,29E+00	0,931	-0,040
15	-1,05E-01	0,964	-1,35E+00	0,974	0,010
14	-1,04E-01	0,961	-1,28E+00	0,925	-0,036
13	-1,04E-01	0,955	-1,27E+00	0,918	-0,037
12	-1,03E-01	0,948	-1,28E+00	0,928	-0,020
11	-1,02E-01	0,940	-1,23E+00	0,886	-0,054
10	-1,01E-01	0,934	-1,19E+00	0,857	-0,077
9	-9,99E-02	0,920	-1,18E+00	0,853	-0,066
8	-9,82E-02	0,904	-1,08E+00	0,783	-0,121
7	-9,63E-02	0,886	-1,03E+00	0,741	-0,146
6	-9,37E-02	0,863	-9,96E-01	0,720	-0,143
5	-9,05E-02	0,833	-8,78E-01	0,635	-0,199
4	-8,62E-02	0,794	-7,71E-01	0,557	-0,237
3	-8,06E-02	0,742	-6,27E-01	0,453	-0,290
2	-7,35E-02	0,677	-4,90E-01	0,354	-0,322
1	-6,07E-02	0,559	-3,12E-01	0,226	-0,333
0	-2,97E-02	0,274	-8,97E-02	0,065	-0,209

Tabulka 6 Hodnoty svislých posunů stropu díla prostorových modelů za předpokladu lineárně pružného a pružně-ideálně plastického konstitutivního modelu chování

3.3 Výpočet vývoje posunů ve směru podélné osy tunelu zajištěného ostěním

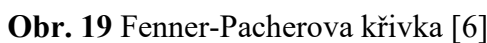
3.3.1 Obecně

Moderní tunelářské metody využívají horninový masiv jako hlavní nosný prvek (pokud to kvalita horninového masivu umožňuje) a zajištění výrubu ostěním masivu dopomáhá k jeho nosné funkci. *Optimálního využití únosnosti horninového masivu a s tím souvisejícího ekonomického návrhu konstrukce ostění lze dosáhnout jen při určité hodnotě deformace systému ostění - hornina, resp. v určitém okamžiku instalace ostění do deformujícího se výrubu* [3]. Ostění eliminuje rozvolnění horninového masivu, které vede k snížení jeho pevnosti. Z Nové rakouské tunelovací metody (NRTM) vyplývá, že výrub musí být zajištěn ve správný čas. To znamená, že se horninovému masivu musí umožnit určité přetvoření, čímž se předejde velkým koncentracím napětí v ostění. *Deformace horninového prostředí se můžou připustit pouze v takovém rozsahu, aby se aktivoval nosný prstenec horniny* [2]. Deformace zajištěného tunelu v určitém horninovém prostředí je výsledkem interakce spolupracujícího systému ostění - hornina.

Další části této diplomové práce se proto zabývá tunelovým dílem zajištěným ostěním.

3.3.2 Fenner-Pacherova křivka

Deformace jsou silně závislé na předpokládaném horninovém napětí v době instalace ostění. Časové hledisko odstupu zabudování ostění za vyražením výrubu je z hlediska velikosti jeho zatížení velice důležitý parametr. Průběh přetváření výrubu v horninovém masivu znázorňuje Fenner-Pacherova křivka (viz Obr. 19). Podle Fennera (1938) a Pachera (1963) v případě, že je tuhá nosná konstrukce ② (viz Obr. 19) nainstalována brzy po vyražení díla, bude zatížena větším zatížením, jelikož se na ni přenesou větší části napětí uvolněného ražbou. Je-li nosná konstrukce ① zabudována po určité deformaci (bod A), systém dosáhne rovnováhy s menším zatížením na ostění tunelu. Napjatost horninového masivu znázorněná křivkou σ_r dosahuje v bodě B minimální hodnoty. To znamená, že se horninový masiv blíží své pevnosti. V tomto místě dochází k rozdělení křivky na dvě větve. Větev klesající znázorňuje *elastoplastické přetváření horniny v důsledku poklesu napětí po vytvoření výrubu* [3]. Větev vzrůstající znázorňuje *narůstající tlak na výztuž výrubu v důsledku postupujícího rozvolňování horninového prostředí* [3]. Časový interval, kdy je nutné uzavřít výrub ostěním, určíme z měření geotechnického monitoringu před a v průběhu výstavby.



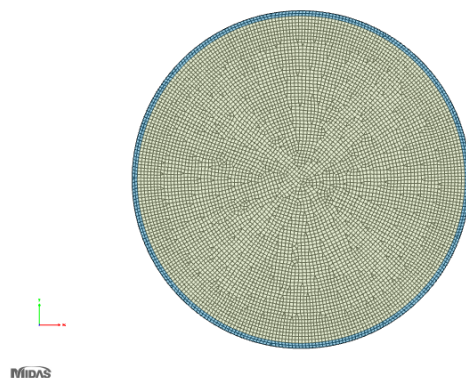
3.3.3 Ostění tunelu

Figure 1 illustrates the comparison between a conventional shell model and a continuum shell model for a curved body. The process starts with a 'Body to be modeled' (a yellow curved block). This body is discretized into two different mesh types:

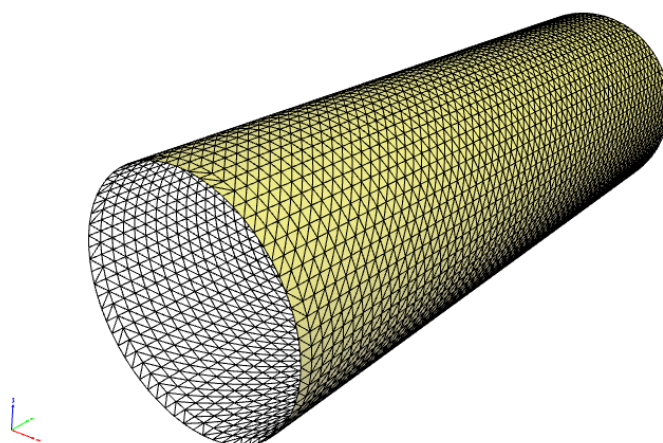
- Conventional shell model:** This model uses a coarse mesh of nodes and elements. The resulting stress state is represented by a few arrows, indicating a simplified stress distribution.
- Continuum shell model:** This model uses a finer mesh, allowing for a more detailed representation of the stress state. The resulting stress state is shown with many arrows, indicating a more complex and distributed stress field.

31

V rovinném modelu tunelového díla bylo nejprve ostění zadáno jako prvek liniový (pruty s uzly v krajních bodech). Při srovnání výsledků s modelem prostorovým, kde ostění bylo zadáno plošně, byly posuny přibližně dvakrát menší. Při plošném zadání ostění i v rovinném modelu (viz Obr. 21) se posuny blížily hodnotám posunů z modelu prostorového. Takto zadaný rovinný model byl použit pro další výpočty.



Obr. 21 Rovinný model výrubu a ostění tvořené sítí konečných trojúhelníkových prvků



Obr. 22 Ostění tunelu v prostorovém numerickém modelu tvořené sítí konečných prvků

Zadané tunelové ostění je zatížené horninovým tlakem a svou vlastní tíhou. *Horninový tlak působící na ostění je výsledkem stavu napjatosti působícího v postupných krocích, simulujících jednotlivé fáze technologického postupu ražby (např. dílčí výrubu, osazení ostění, kotvení apod.). Velikost horninového tlaku závisí na primární napjatosti horninového masivu, fyzikálně-mechanických vlastnostech prostředí a konstitutivních vztazích popisujících chování horniny i ostění za určitého stavu napjatosti [3].*

Pro ostění tunelu byla použita vrstva betonu třídy C 12/15 tloušťky $t_c = 0,15$ m se střední hodnotou modulu pružnosti $E_{cm} = 26$ GPa, která měla plný kontakt po celém obvodu s podepíraným horninovým masivem. Poissonovo číslo betonu bylo zadáno s hodnotou $\nu = 0,2$ a objemová tíha $\gamma = 24$ kNm⁻³. Geometrie modelu a materiálové charakteristiky horninového masivu byly pro nezajištěné i zajištěné dílo identické, aby bylo možno provést srovnání všech vypočtených modelů. Hodnota součinitele bočního tlaku K , v modelu pro zajištěné dílo, byla snížena v porovnání s nezajištěným dílem na hodnotu $K = 0,54$. K tomuto snížení součinitele bočního tlaku (tzn. snížení vodorovné složky primární napjatosti) bylo nutno přistoupit z toho důvodu, aby bylo pro stabilizaci výrubu ostění nutné. V případě rovnosti svislé a vodorovné složky primární napjatosti ($K = 1$) bylo odpovídající dílo stabilní i bez stabilizace ostěním (viz předchozí analýzy v kapitole 3.2). Součinitel bočního tlaku K byl vypočten dle vzorce č. 12 pro soudržné zeminy (Poissonovo číslo horninového masivu $\nu = 0,35$).

$$K = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (12)$$

3.3.4 Lineárně pružný model deformačního chování zajištěného díla

Byl proveden výpočet rovinného a prostorového matematického modelu tunelu zajištěného ostěním v pružném oboru přetváření. Průběh svislých posunů stropu v podélném směru tunelu vycházejícího z prostorového modelu a maximální radiální svislý posun stropu díla vyplývající z modelu rovinného jsou znázorněny v grafu č. 4. Výpočet byl rozdělen do třech fází (viz Obr. 9):

1. fáze Iniciační fáze

Výpočet primární (geostatické) napjatosti horninového masivu představující počáteční stav před provedením výrubu.

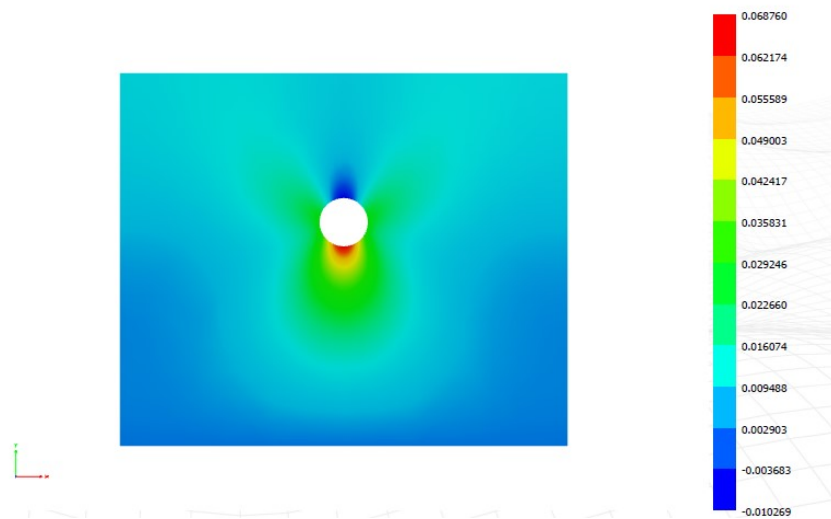
2. fáze Výrub tunelu

Vyražení tunelu v masivu. Tím dochází k odlehčení, změně stavu primární rovnováhy a k nastolení sekundárního stavu rovnováhy odpovídající relaxaci horninového masivu. Míra relaxace je v případě rovinného modelu nastavena v jednotlivých fázích pomocí relaxačního součinitele β (relaxace napětí).

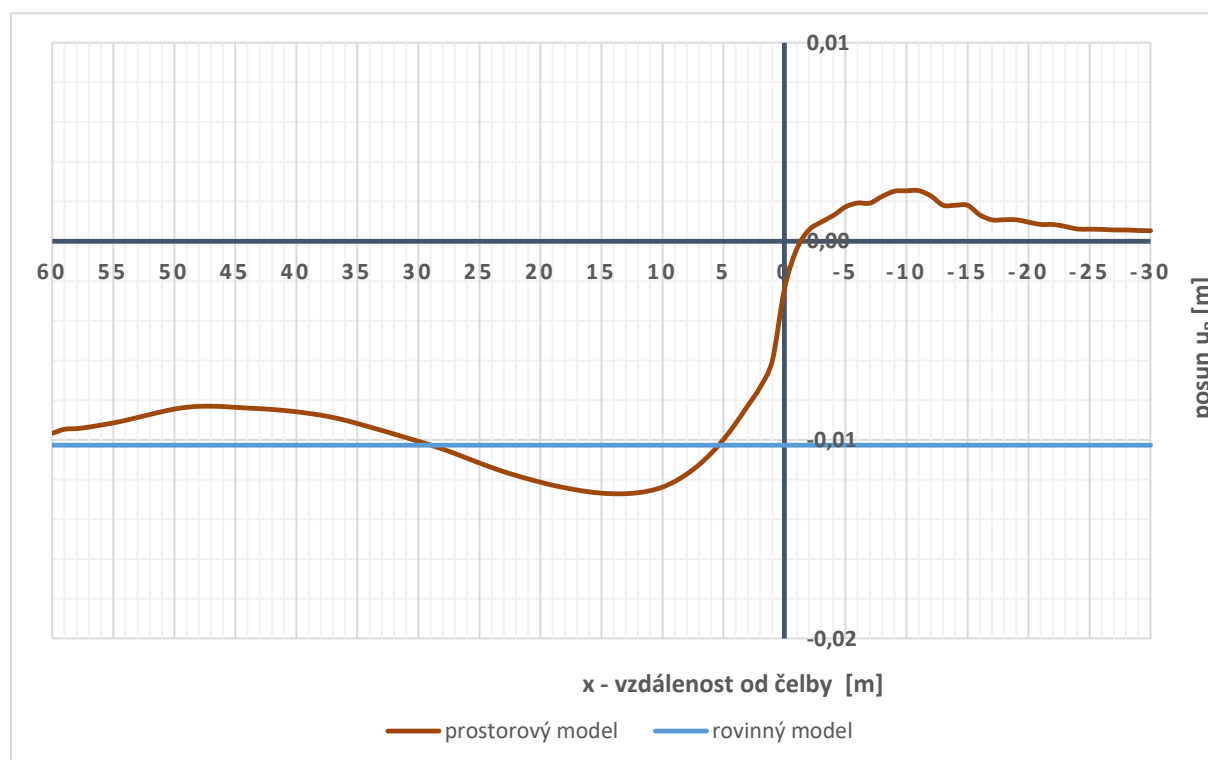
3. fáze Zajištění tunelu ostěním

Aktivace ostění a iniciace určitého podílu relaxace v závislosti na β -součiniteli.

Maximální svislý posun stropu prostorového modelu dosahoval hodnoty $u_r = -1,27E-02$ m ve vzdálenosti 14 m od čelby. Tento posun je přibližně o 23 % větší než hodnota radiálního svislého posunu ($u_r = -1,03E-02$ m) získaného z modelu rovinného (viz Obr. 23). Určité snížení posunů v prostorovém modelu směrem k jeho hranici je do značné míry způsobeno okrajovými podmínkami i nižší hustotou sítě směrem k hranicím modelu.



Obr. 23 Svislé posuny rovinného modelu – dílo s ostěním



Graf č. 4 Průběh svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu vyplývajícího z numerického řešení v oboru pružného přetváření – tunel s ostěním

3.4 Stanovení součinitele relaxace (β -součinitele)

Následující část diplomové práce se zabývá jejím hlavním tématem, tj. stanovením součinitele relaxace. Tento součinitel byl určován pro dílo nezajištěné, zajištěné ostěním až čelbě a zajištěné ostěním až od určité vzdálenosti od čelby. Součinitel relaxace vychází z β -metody, kde simuluje postupnou relaxaci horninového masivu po jeho odlehčení vyražením díla. V prostředí softwaru MIDAS GTS NX je možno zohlednit postupnou relaxaci horninového masivu v jednotlivých modelových fázích pomocí funkce LDF (Load Distribution Factor).

3.4.1 Dílo nezajištěné (resp. zajištěné ostěním) až k čelbě

Změna míry relaxace byla aplikována na základě β -metody ve dvou výpočetních modelových fázích. V případě díla bez ostění byl v první fázi zohledněn vliv čelby uplatněnou mírou relaxace $(1 - \beta)p_0$ (posuny z této fáze jsou dále eliminovány, což umožňuje zohlednit vliv čelby na velikost svislých posunů). V další fázi modelování pro nezajištěné dílo byla uplatněna relaxace βp_0 . Čím je tedy hodnota součinitele relaxace vyšší, tím menší část posunů eliminujeme, což odpovídá nižšímu vlivu čelby. V případě $\beta = 1$ dostáváme hodnoty posunů maximálních (bez vlivu čelby). V případě díla zajištěného ostěním uplatněná míra relaxace v první modelové fázi odpovídá dílu bez ostění $(1 - \beta)p_0$, v druhé fázi při instalaci ostění βp_0 . Postupovalo se od hodnoty součinitele $\beta = 1,0$ (celková relaxace na ostění – odpovídá maximálnímu posunu ostění) po hodnotu součinitele $\beta = 0,0$ (ostění není zatíženo žádným vlivem relaxace, posuny odpovídající celkové relaxaci proběhly již před instalací ostění).

V tabulce 7 a 8 můžeme vidět hodnoty svislých posunů stropu u_r pro měnící se součinitel β (zvýrazněné řádky) a tím měnící se míru relaxace aplikované v modelu ve fázi instalace ostění. Takto získané výsledky posunů byly poté porovnány s průběhem svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu prostorového modelu nezajištěného díla (resp. zajištěného ostěním – Tabulka 8). Parametr x označuje vzdálenost od čelby, která odpovídá danému posunu.

βp_0	$\beta_1=1,0$	$\beta_2=0,9$	$\beta_3=0,8$	$\beta_4=0,7$	$\beta_5=0,6$	$\beta_6=0,5$	$\beta_7=0,4$	$\beta_8=0,3$	$\beta_9=0,2$	$\beta_{10}=0,1$	$\beta_{11}=0,0$
u_r^*	-1,15E-01	-1,04E-01	-9,23E-02	-8,08E-02	-6,92E-02	-6,64E-02	-4,62E-02	-3,46E-02	-2,31E-02	-1,15E-02	0,00E+00
w	9,51E-01										
u_r	-1,10E-01	-9,88E-02	-8,78E-02	-7,68E-02	-6,58E-02	-6,31E-02	-4,39E-02	-3,29E-02	-2,19E-02	-1,10E-02	0,00E+00
x	30,00	8,70	4,50	2,40	1,30	1,10	0,50	0,08	0,00	0,00	0,00

Tabulka 7 Hodnoty svislých posunů stropu rovinného modelu díla nezajištěného ostěním při aplikaci β -metody

β_{p_0}	$\beta_1=1,0$	$\beta_2=0,9$	$\beta_3=0,8$	$\beta_4=0,7$	$\beta_5=0,6$	$\beta_6=0,5$	$\beta_7=0,4$	$\beta_8=0,3$	$\beta_9=0,2$	$\beta_{10}=0,1$	$\beta_{11}=0,0$
u_r^*	-1,01E-02	-9,19E-03	-8,20E-03	-7,25E-03	-6,30E-03	-5,34E-03	-4,39E-03	-3,44E-03	-2,49E-03	-1,53E-03	0,00E+00
w	1,24E+00										
u_r	-1,25E-02	-1,14E-02	-1,02E-02	-8,98E-03	-7,80E-03	-6,62E-03	-5,44E-03	-4,26E-03	-3,08E-03	-1,90E-03	0,00E+00
x	10,40	7,30	5,30	3,80	2,50	1,30	0,80	0,50	0,30	0,00	0,00

Tabulka 8 Hodnoty svislých posunů stropu rovinného modelu díla zajištěného ostěním při aplikaci β -metody

kde u_r^* je radiální svislý posun stropu díla vycházející z rovinného modelu; w je podíl mezi výsledkem posunu prostorového a rovinného modelu; u_r je radiální svislý posun stropu díla vycházející z rovinného modelu násobený podílem w ; x je vzdálenost od čelby.

Závislost součinitele relaxace β na vzdálenosti x od čelby (resp. na poměru x/r_i , kdy r_i je poloměr díla), jak pro dílo nezajištěné, tak zajištěné ostěním je znázorněna v grafu č. 5 (resp. grafu č. 6). Tyto závislosti byly vyjádřeny do následujících regresních funkcí.

Graf č. 5:

nezajištěné dílo

$$\beta = 1,021e^{-\frac{1,146}{(x+0,676)}} \quad (15)$$

dílo zajištěné ostěním

$$\beta = 0,286 \ln(x + 0,475) + 0,306 \quad (16)$$

Graf č. 6:

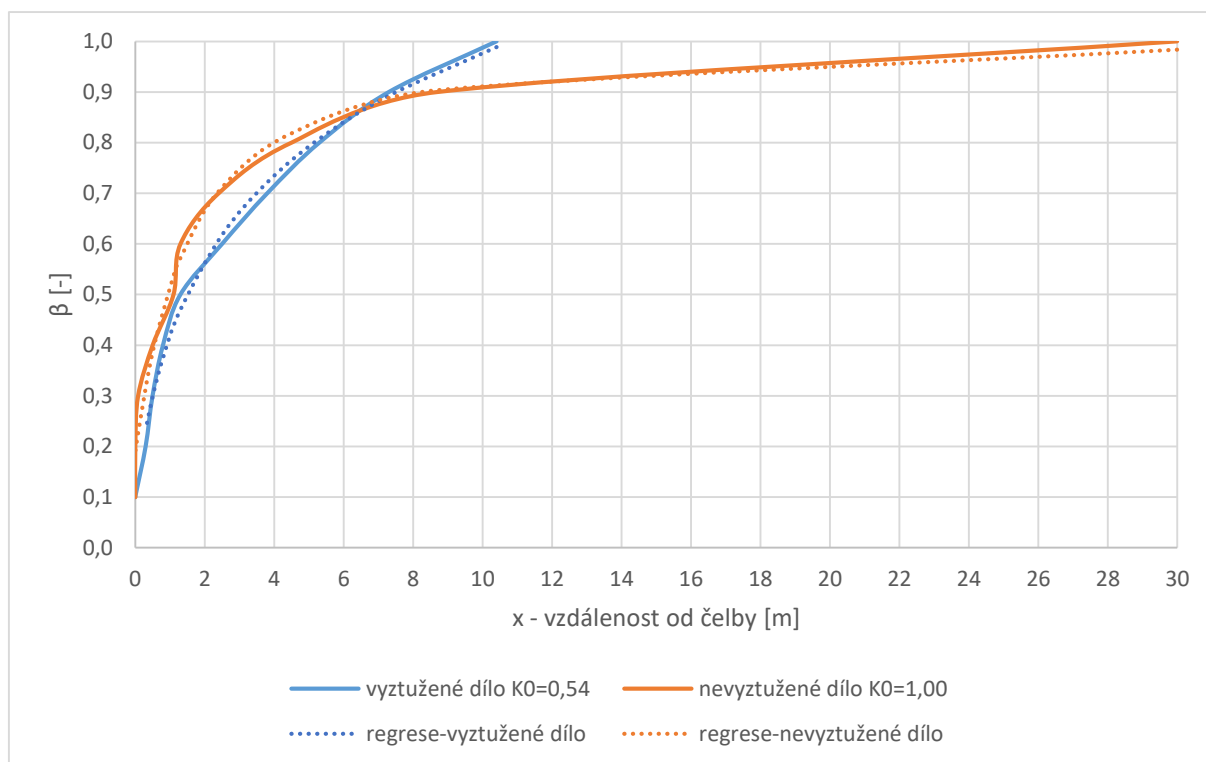
nezajištěné dílo

$$\beta = 1,021e^{-\frac{0,229}{(\frac{x}{r_i}+0,135)}} \quad (17)$$

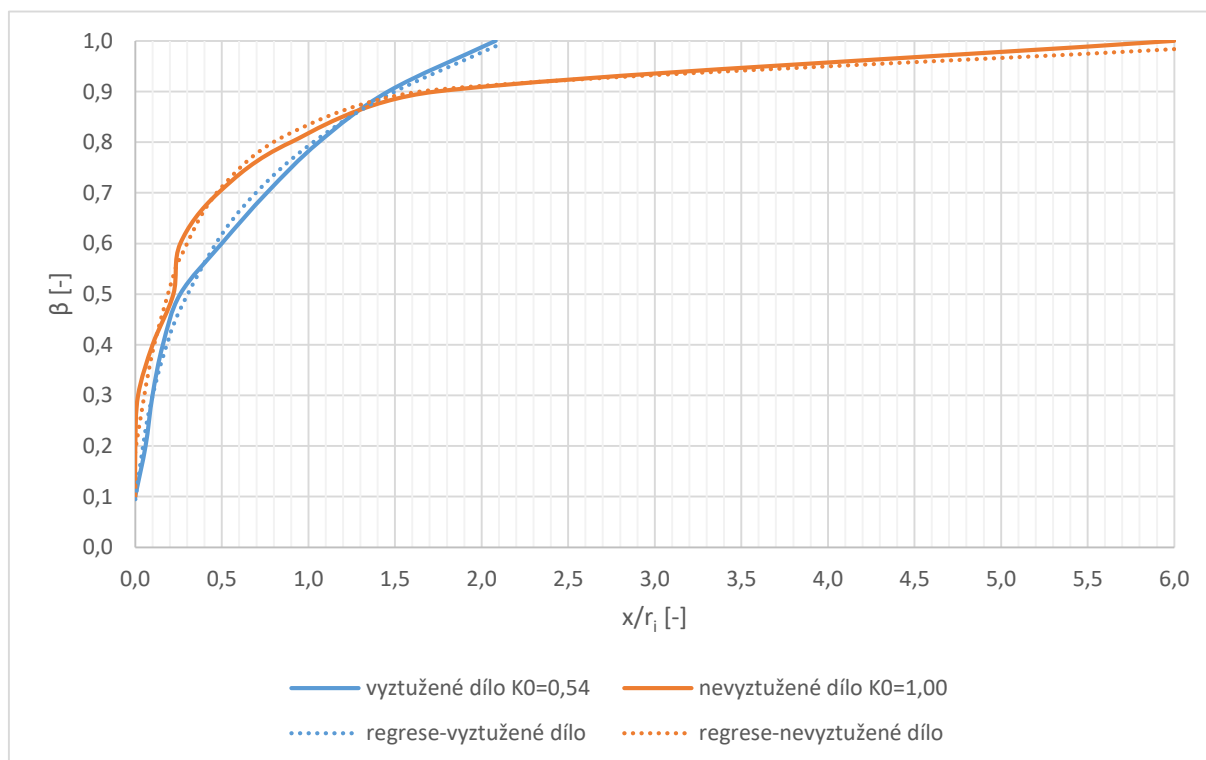
dílo nezajištěné ostěním

$$\beta = 0,286 \ln\left(\frac{x}{r_i} + 0,095\right) + 0,767 \quad (18)$$

Hodnota součinitele relaxace se může pohybovat v rozmezí od $\beta = 0$ do $\beta = 1$.



Graf č. 5 Závislost součinitele relaxace β na vzdálenosti od čelby

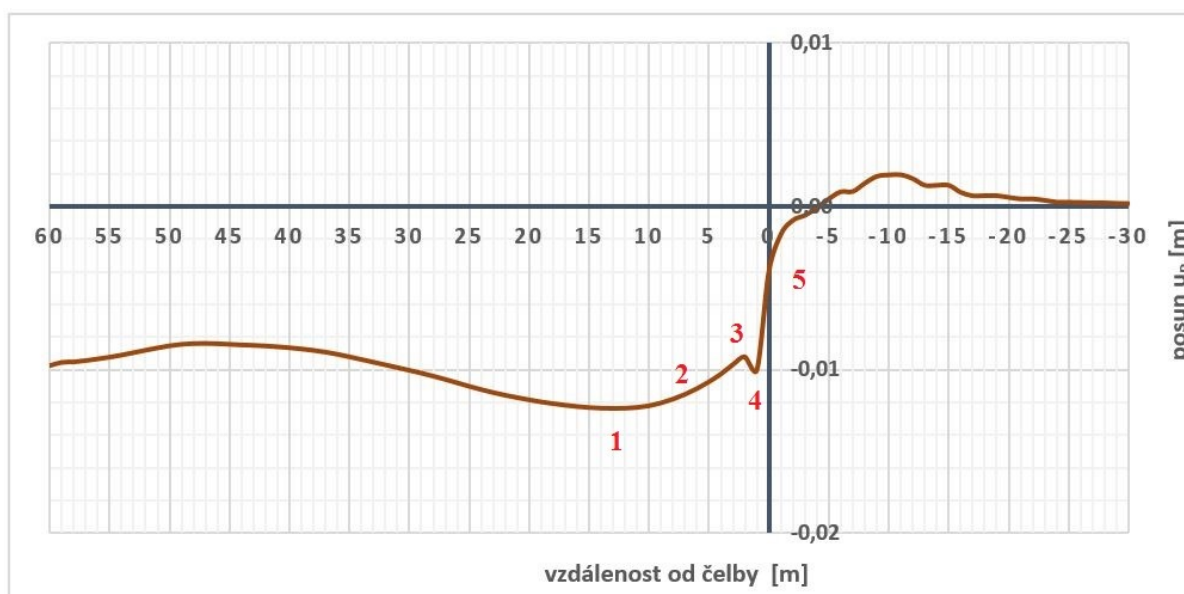


Graf č. 6 Závislost součinitele relaxace β na poměru x/r_i

3.4.2 Dílo zajištěné ostěním od určité vzdálenosti od čelby

Dále byl zkoumán vliv délky nezajištěné části výrubu od čelby na velikost součinitele relaxace. Při výpočtech bylo uvažováno ostění vzdálené 1, 2 a 5 m od čelby. Cílem bylo stejně jako v předchozích případech získat průběhy svislých posunů stropu díla v různých vzdálenostech od čelby v závislosti na odstupu instalace ostění od čelby na základě rovinného modelu s využitím metody relaxace. V rámci realizované analýzy bylo zvoleno 5 charakteristických bodů v různých vzdálenostech od čelby (viz Obr. 24).

- | | |
|--------|--|
| 1. bod | maximální svislý posun stropu tunelu v části zajištěné ostěním |
| 2. bod | mezilehlý svislý posun stropu tunelu v části zajištěné ostěním |
| 3. bod | minimální svislý posun stropu tunelu v části zajištěné ostěním |
| 4. bod | maximální svislý posun stropu tunelu v části nezajištěné ostěním |
| 5. bod | svislý posun stropu na čelbě tunelu |



Obr. 24: Znázornění charakteristických bodů průběhu svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu získaného z prostorového modelu částečně zajištěného díla ostěním

Relaxace byla v rovinném modelu aplikována ve třech modelových krocích:

$$\beta_1 p_0 + \beta_2 p_0 + \beta_3 p_0 \quad (19)$$

- | | |
|-----------|---|
| β_1 | nezajištěné dílo (eliminace posunů; míra relaxace β_1) |
| β_2 | nezajištěné dílo (bez eliminace posunů; míra relaxace β_2) |
| β_3 | zajištěné dílo ostěním (bez eliminace posunů; míra relaxace β_3) |

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1 \quad (20)$$

Dílo s ostěním 1 m od čelby:

V grafu č. 7 můžeme vidět průběh svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu získaného z prostorového modelu, je-li ostění instalováno 1 m od čelby. V tabulce 9 vidíme hodnoty součinitelů relaxace (β -součinitelů) pro charakteristické body a posuny získané při jejich aplikaci v modelu rovinném. Modře znázorněný průběh v grafu č. 7 znázorňuje závislost těchto posunů na vzdálenosti od čelby. V grafu č. 8 (resp. grafu č. 9) je vynesena závislost jednotlivých součinitelů relaxace na vzdálenosti x od čelby (resp. na poměru x/r_i , kdy r_i je poloměr díla). Každý tento průběh je vyjádřen regresní funkcí:

$$\beta = k_1 f_1 + k_2 f_2 \quad (21)$$

kde k_1, k_2 jsou součinitelé závislé na vzdálenosti x od čelby („přepínač“ mezi funkcemi f_1 nebo f_2), f_1 je funkce regrese vztahující se na nezajištěný úsek ostěním, f_2 je funkce regrese vztahující se na zajištěný úsek ostěním. Pro k_1 a k_2 platí:

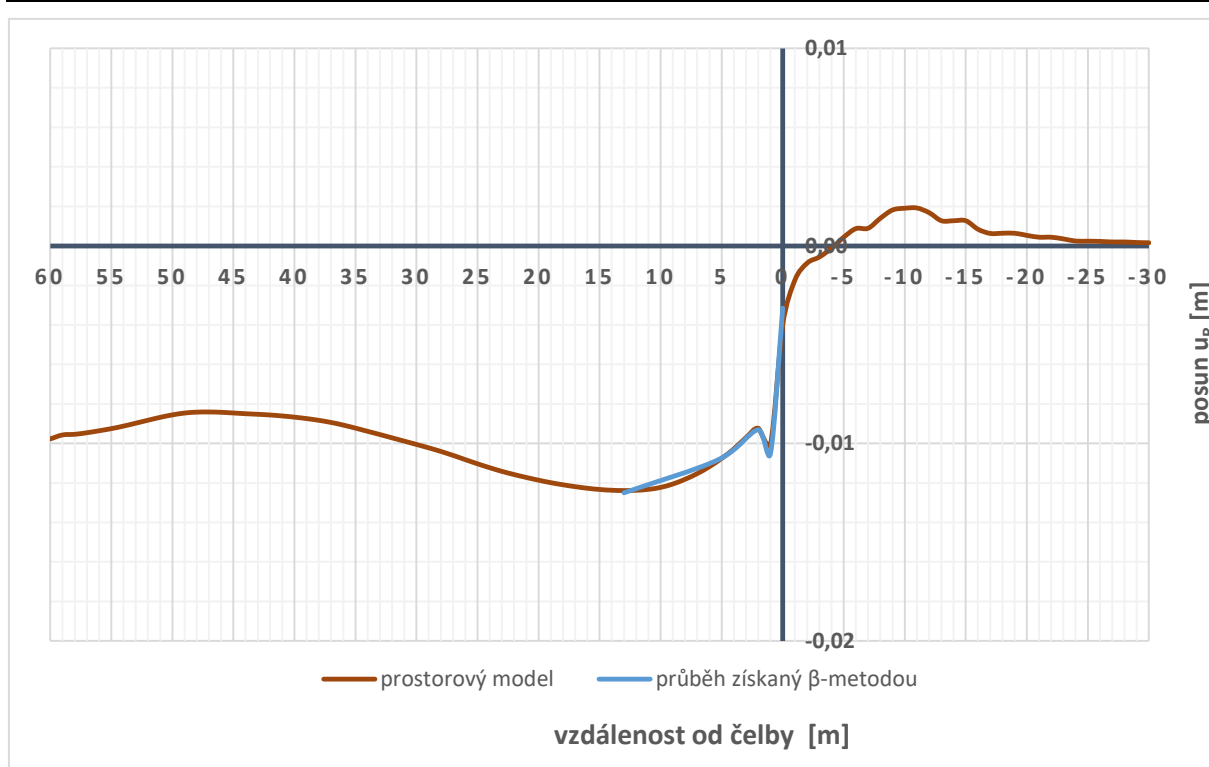
$0 \leq \text{vzdálenost od čelby} \leq \text{nezajištěný úsek:}$ $k_1 = 1$ a $k_2 = 0$

$\text{vzdálenost od čelby} > \text{nezajištěný úsek:}$ $k_1 = 0$ a $k_2 = 1$.

Při závislosti součinitele relaxace na poměru x/r_i (graf č. 9) pro k_1 a k_2 platí:

$0 \leq \text{vzdálenost od čelby}/r_i \leq \text{nezajištěný úsek}/r_i:$ $k_1 = 1$ a $k_2 = 0$

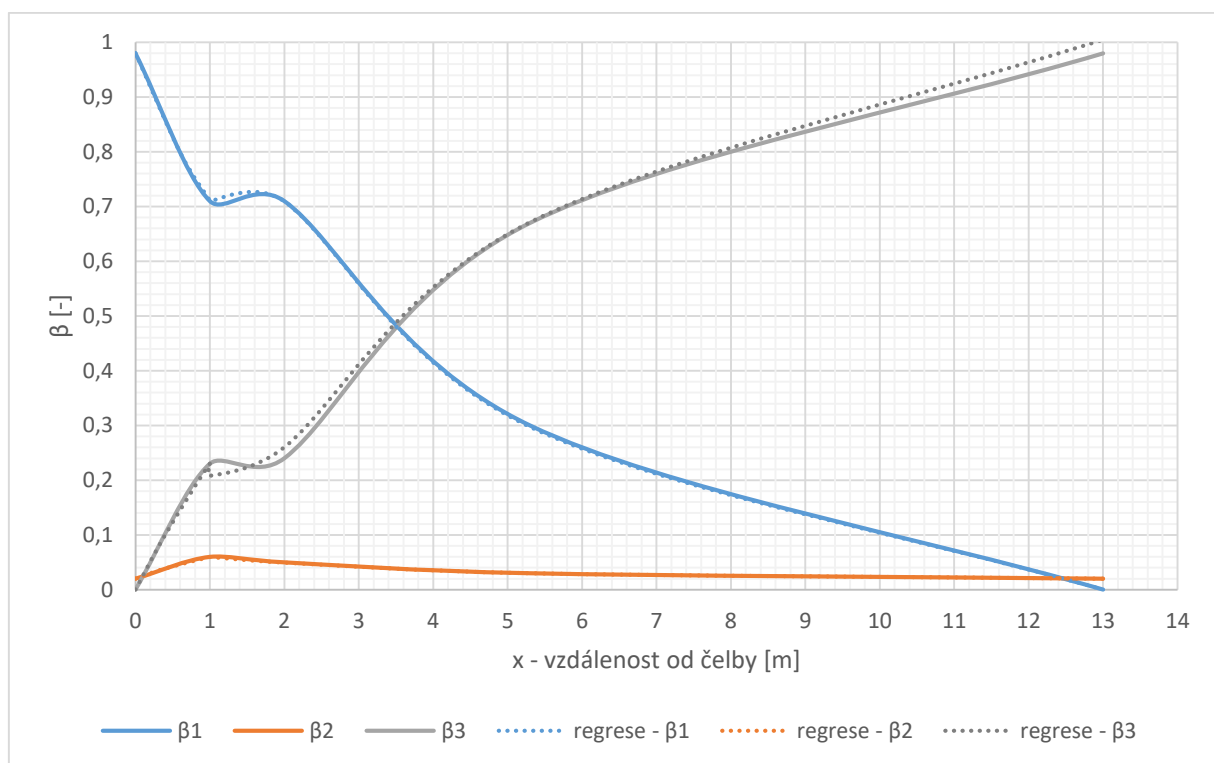
$\text{vzdálenost od čelby}/r_i > \text{nezajištěný úsek}/r_i:$ $k_1 = 0$ a $k_2 = 1$.



Graf č. 7 Průběh svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu získaného z prostorového modelu pro dílo zajištěné ostěním až od vzdálenosti 1 m od čelby

		β_1 [-]	β_2 [-]	β_3 [-]	svislý posun 2D model [m]	svislý posun 3D model [m]	x [m]	x/r ₁ [-]
1. bod	max. svislý posun stropu - část s ostěním	0	0,02	0,98	-1,25E-02	-1,24E-02	13,00	2,60
2. bod	mezilehlý svislý posun stropu	0,3	0,03	0,67	-1,08E-02	-1,10E-02	5,30	1,06
3. bod	min. svislý posun stropu - část s ostěním	0,71	0,05	0,24	-9,30E-03	-9,23E-03	2,00	0,40
4. bod	max. svislý posun stropu - část bez ostěním	0,71	0,06	0,23	-1,05E-02	-1,00E-02	1,00	0,20
5. bod	svislý posun stropu na čelbě	0,98	0,02	0	-3,15E-03	-3,98E-03	0,00	0,00

Tabulka 9 Velikost β -součinitelů v charakteristických bodech průběhu svislého posunu stropu ve směru podélné osy tunelu pro dílo zajištěné ostěním až od vzdálenosti 1 m od čelby



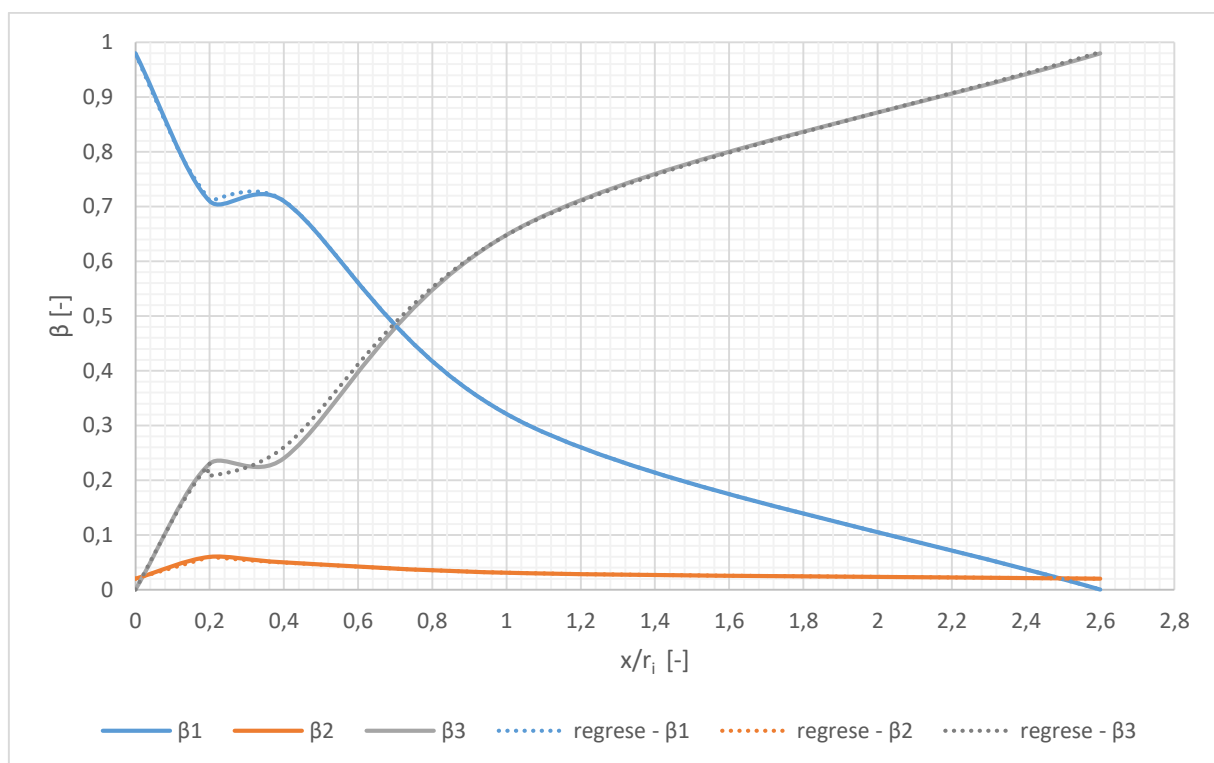
Graf č. 8 Závislost β -součinitele na vzdálenosti x od čelby pro dílo zajištěné ostěním 1 m od čelby

Rovnice pro jednotlivé průběhy β -součinitelů v závislosti na vzdálenosti od čelby:

$$\beta_1 = k_1 \cdot \frac{2,587}{(x + 2,639)} + k_2 \cdot 0,629e^{-0,061x^2 + 0,182x} \quad (22)$$

$$\beta_2 = k_1 \cdot 0,071 \ln(x + 1,331) + k_2 \cdot 0,074e^{0,009x^2 - 0,217x} \quad (23)$$

$$\beta_3 = k_1 \cdot 0,23x^{0,909} + k_2 \cdot \frac{1}{(0,059x^2 - 1,144x + 5,896)} \quad (24)$$



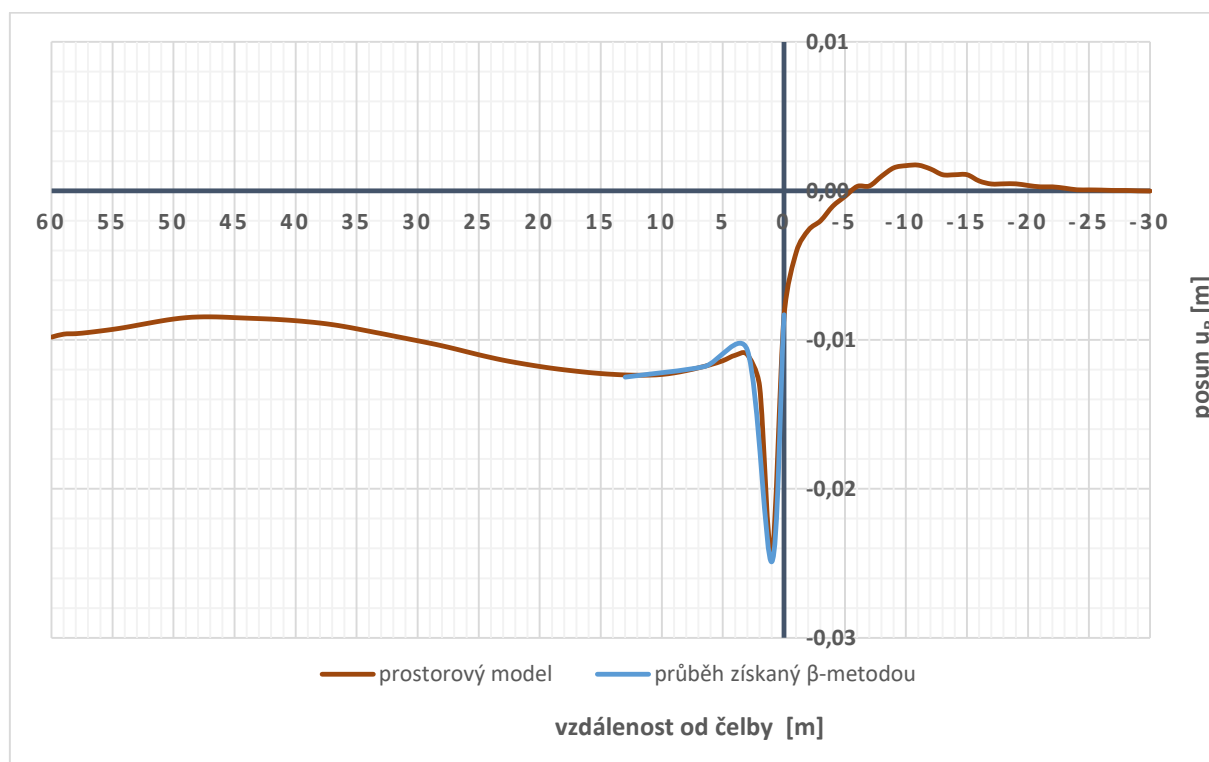
Graf č. 9 Závislost β -součinitele na poměru x/r_i (x je vzdálenost od čelby, r_i je poloměr díla) pro dílo zajištěné ostěním 1 m od čelby

Rovnice pro jednotlivé průběhy β -součinitelů v závislosti na poměru x/r_i :

$$\beta_1 = k_1 \cdot \frac{0,517}{\left(\frac{x}{r_i} + 0,528\right)} + k_2 \cdot 0,629 e^{-1,518\left(\frac{x}{r_i}\right)^2 + 0,911\frac{x}{r_i}} \quad (25)$$

$$\beta_2 = k_1 \cdot \left(0,2\frac{x}{r_i} + 0,02\right) + k_2 \cdot 0,074 e^{0,223\left(\frac{x}{r_i}\right)^2 - 1,085\frac{x}{r_i}} \quad (26)$$

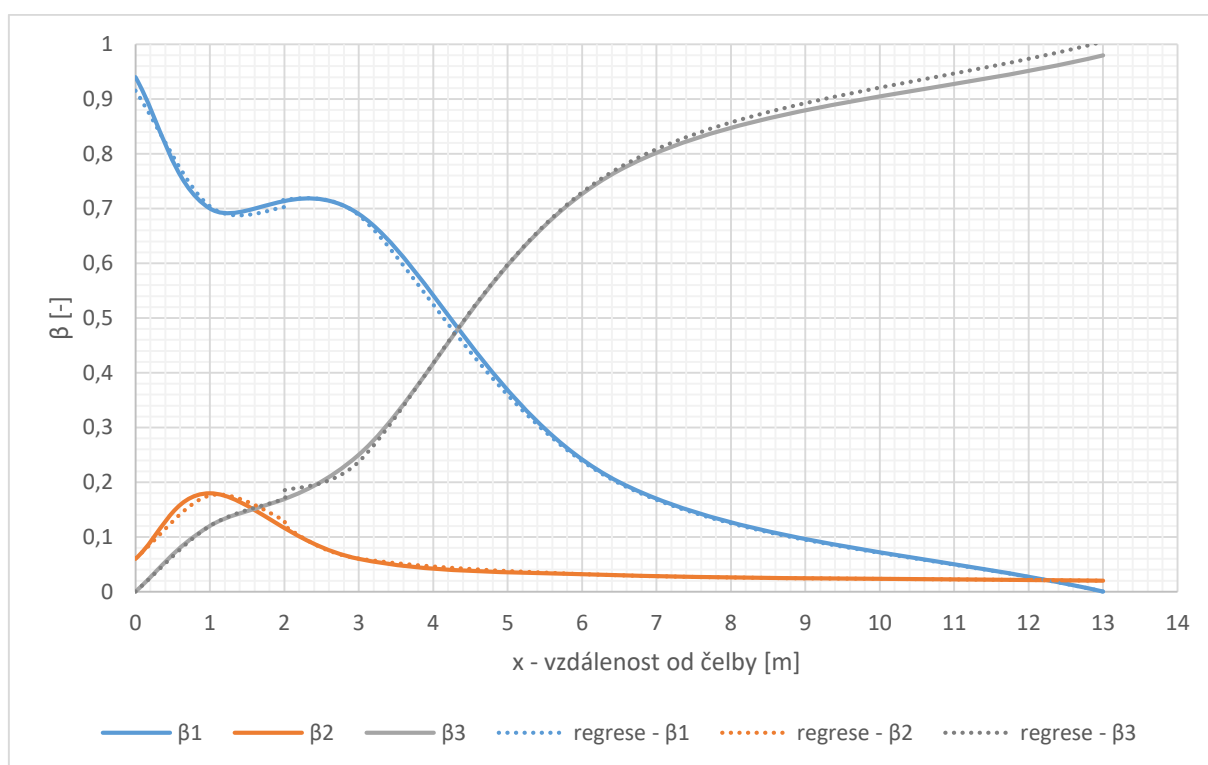
$$\beta_3 = k_1 \cdot 0,865 \left(\frac{x}{r_i}\right)^{0,823} + k_2 \cdot \frac{1}{\left(1,478\left(\frac{x}{r_i}\right)^2 - 5,719\frac{x}{r_i} + 5,896\right)} \quad (27)$$

Dílo s ostěním 2 m od čelby:

Graf č. 10 Průběh svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu získaného z prostorového modelu pro dílo zajištěné ostěním až od vzdálenosti 2 m od čelby

		β_1 [-]	β_2 [-]	β_3 [-]	svislý posun 2D model [m]	svislý posun 3D model [m]	x [m]	x/r ₁ [-]
1. bod	max. svislý posun stropu - část s ostěním	0	0,02	0,98	-1,25E-02	-1,24E-02	13,00	2,60
2. bod	mezilehlý svislý posun stropu	0,2	0,03	0,77	-1,18E-02	-1,18E-02	6,50	1,30
3. bod	min. svislý posun stropu - část s ostěním	0,69	0,06	0,25	-1,07E-02	-1,10E-02	3,00	0,60
4. bod	max. svislý posun stropu - část bez ostěním	0,7	0,18	0,12	-2,49E-02	-2,45E-02	1,00	0,20
5. bod	svislý posun stropu na čelbě	0,94	0,06	0	-8,30E-03	-8,42E-03	0,00	0,00

Tabulka 10 Velikost β -součinitelů v charakteristických bodech průběhu svislého posunu stropu ve směru podélné osy tunelu pro dílo zajištěné ostěním až od vzdálenosti 2 m od čelby



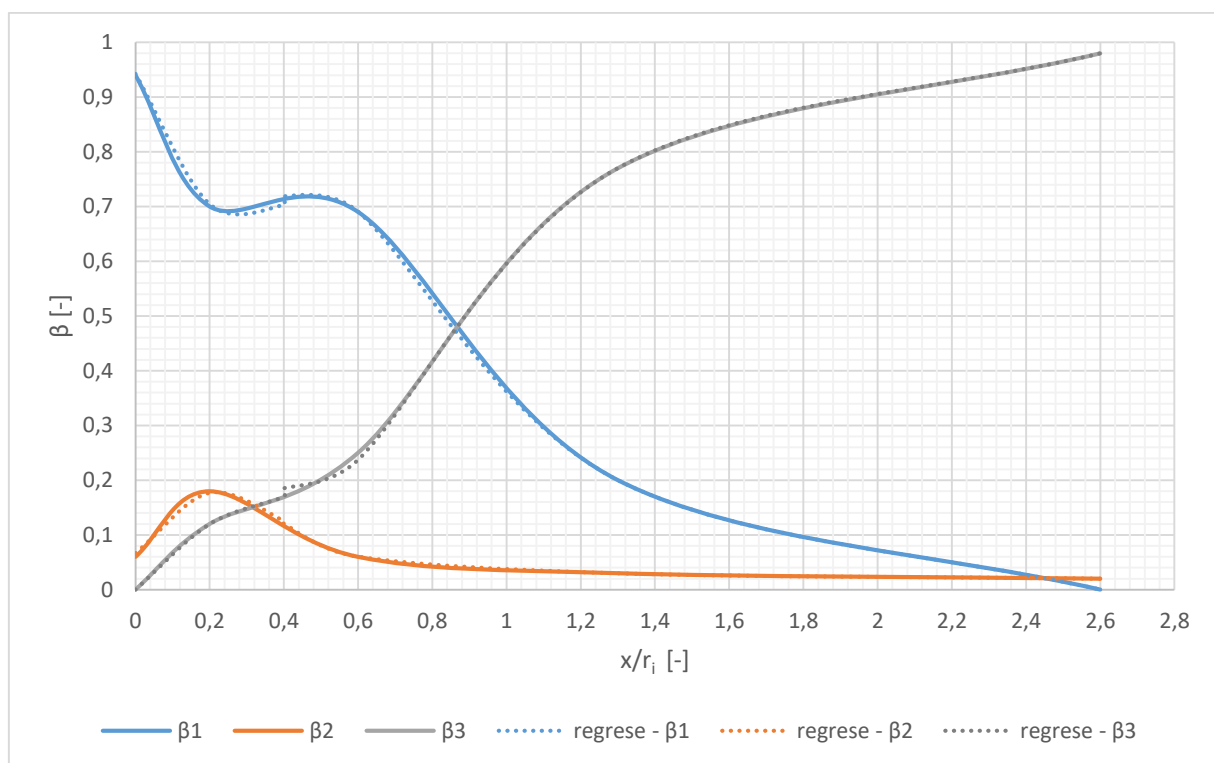
Graf č. 11 Závislost β -součinitele na vzdálenosti x od čelby pro dílo zajištěné ostěním 2 m od čelby

Rovnice pro jednotlivé průběhy β -součinitelů v závislosti na vzdálenosti od čelby:

$$\beta_1 = k_1 \cdot \left(\frac{0,003}{x + 0,014} + 0,701 \right) + k_2 \cdot 0,511 e^{-0,07x^2 + 0,309x} \quad (28)$$

$$\beta_2 = k_1 \cdot \left(-0,159x + 0,274x^{\frac{1}{2}} + 0,061 \right) + k_2 \cdot \frac{1}{(135,501x^{0,133} - 140,254)} \quad (29)$$

$$\beta_3 = k_1 \cdot 0,12x^{0,503} + k_2 \cdot \frac{1}{(0,079x^2 - 1,586x + 8,262)} \quad (30)$$



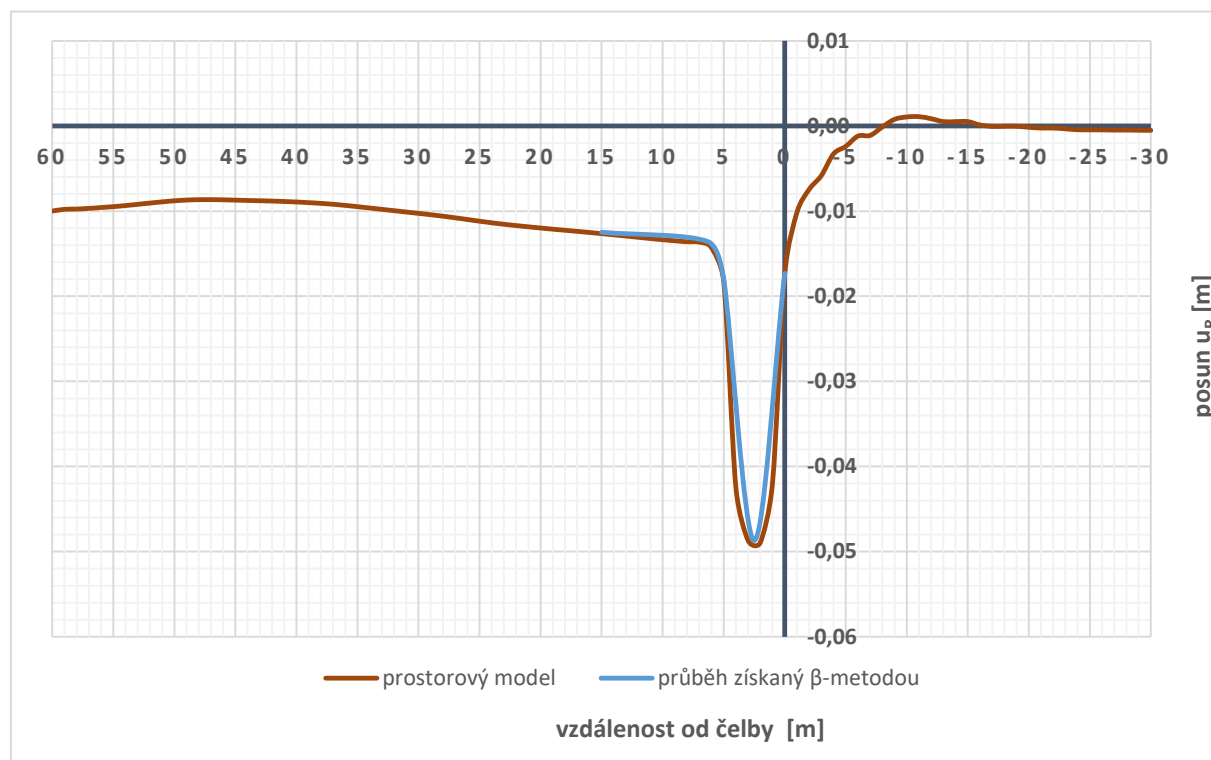
Graf č. 12 Závislost β -součinitele na poměru x/r_i (x je vzdálenost od čelby, r_i je poloměr díla) pro dílo zajištěné ostěním 2 m od čelby

Rovnice pro jednotlivé průběhy β -součinitelů v závislosti na poměru x/r_i :

$$\beta_1 = k_1 \cdot \left(\frac{0,0007}{\frac{x}{r_i} + 0,0029} + 0,701 \right) + k_2 \cdot 0,512 e^{-1,745 \left(\frac{x}{r_i} \right)^2 + 1,546 \frac{x}{r_i}} \quad (31)$$

$$\beta_2 = k_1 \cdot \left(\frac{1}{145,666 \left(\frac{x}{r_i} \right)^2 - 75,844 \left(\frac{x}{r_i} \right) + 14,987} \right) + k_2 \cdot \left(\frac{1}{184,242 \left(\frac{x}{r_i} \right)^{0,121} - 156,612} \right) \quad (32)$$

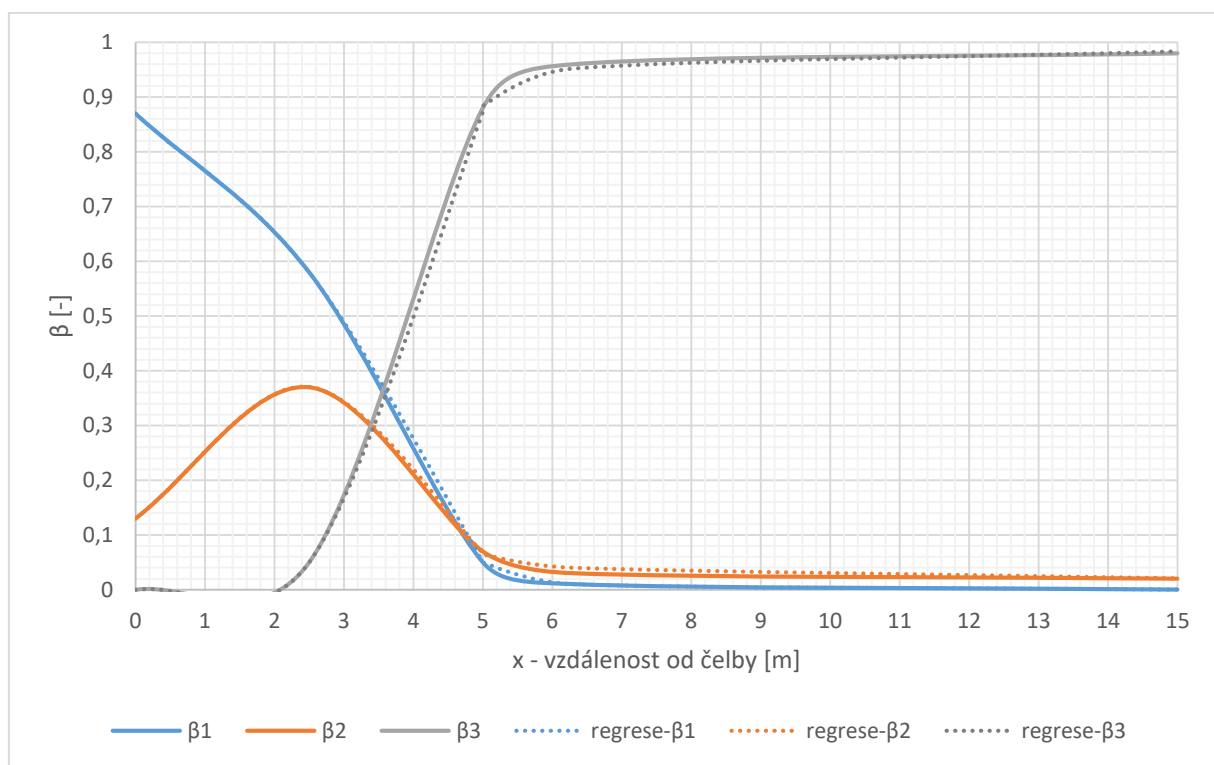
$$\beta_3 = k_1 \cdot 0,269 \left(\frac{x}{r_i} \right)^{0,503} + k_2 \cdot \frac{1}{(1,978 \left(\frac{x}{r_i} \right)^2 - 7,928 \frac{x}{r_i} + 8,262)} \quad (33)$$

Dílo s ostěním 5 m od čelby:

Graf č. 13 Průběh svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu získaného z prostorového modelu pro dílo zajištěné ostěním až od vzdálenosti 5 m od čelby

		β_1 [-]	β_2 [-]	β_3 [-]	svislý posun 2D model [m]	svislý posun 3D model [m]	x [m]	x/r ₁ [-]
1. bod	max. svislý posun stropu - část s ostěním	0	0,02	0,98	-1,25E-02	-1,26E-02	15,00	3,00
2. bod	mezilehlý svislý posun stropu	0,01	0,03	0,96	-1,36E-02	-1,38E-02	6,30	1,26
3. bod	min. svislý posun stropu - část s ostěním	0,05	0,07	0,88	-1,80E-02	-1,82E-02	5,00	1,00
4. bod	max. svislý posun stropu - část bez ostěním	0,58	0,37	0,05	-4,87E-02	-4,89E-02	2,50	0,50
5. bod	svislý posun stropu na čelbě	0,87	0,13	0	-1,73E-02	-1,74E-02	0,00	0,00

Tabulka 11 Velikost β -součinitelů v charakteristických bodech průběhu svislého posunu stropu ve směru podélné osy tunelu pro dílo zajištěné ostěním až od vzdálenosti 5 m od čelby



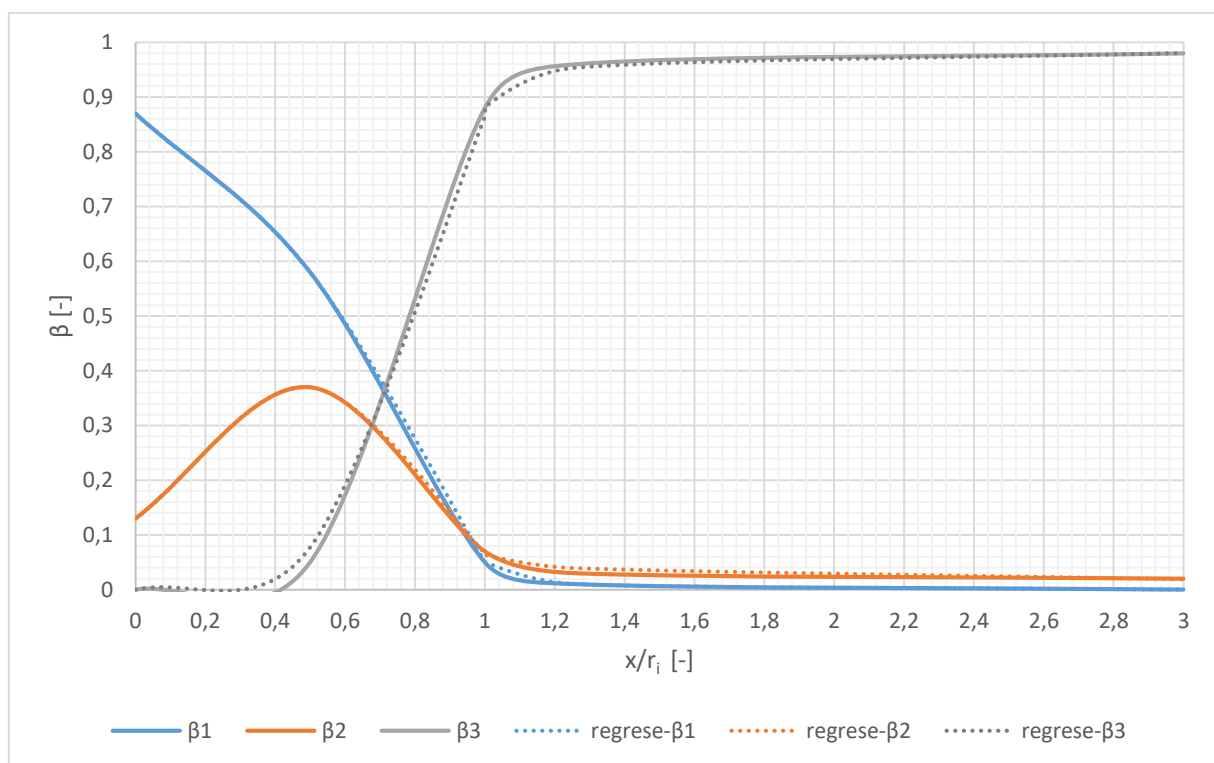
Graf č. 14 Závislost β -součinitele na vzdálenosti x od čelby pro dílo zajištěné ostěním 5 m od čelby

Rovnice pro jednotlivé průběhy β -součinitelů v závislosti na vzdálenosti od čelby:

$$\beta_1 = k_1 \cdot 0,87e^{-0,162x^2+0,243x} + k_2 \cdot 0,774e^{-0,11x^2} \quad (34)$$

$$\beta_2 = k_1 \cdot \frac{1}{(1,378x^2 - 5,446x + 7,702)} + k_2 \cdot e^{0,029x^2-0,694x} \quad (35)$$

$$\beta_3 = k_1 \cdot 0,00025x^{10,859}e^{-1,864x} + k_2 \cdot x^{-0,006}e^{-227,213x^{-4,721}} \quad (36)$$



Graf č. 15 Závislost β -součinitele na poměru x/r_i (x je vzdálenost od čelby, r_i je poloměr díla) pro dílo zajištěné ostěním 5 m od čelby

Rovnice pro jednotlivé průběhy β -součinitelů v závislosti na poměru x/r_i :

$$\beta_1 = k_1 \cdot 0,87 e^{-4,056 \left(\frac{x}{r_i}\right)^2 + 1,217 \frac{x}{r_i}} + k_2 \cdot 0,774 e^{-2,739 \left(\frac{x}{r_i}\right)^2} \quad (37)$$

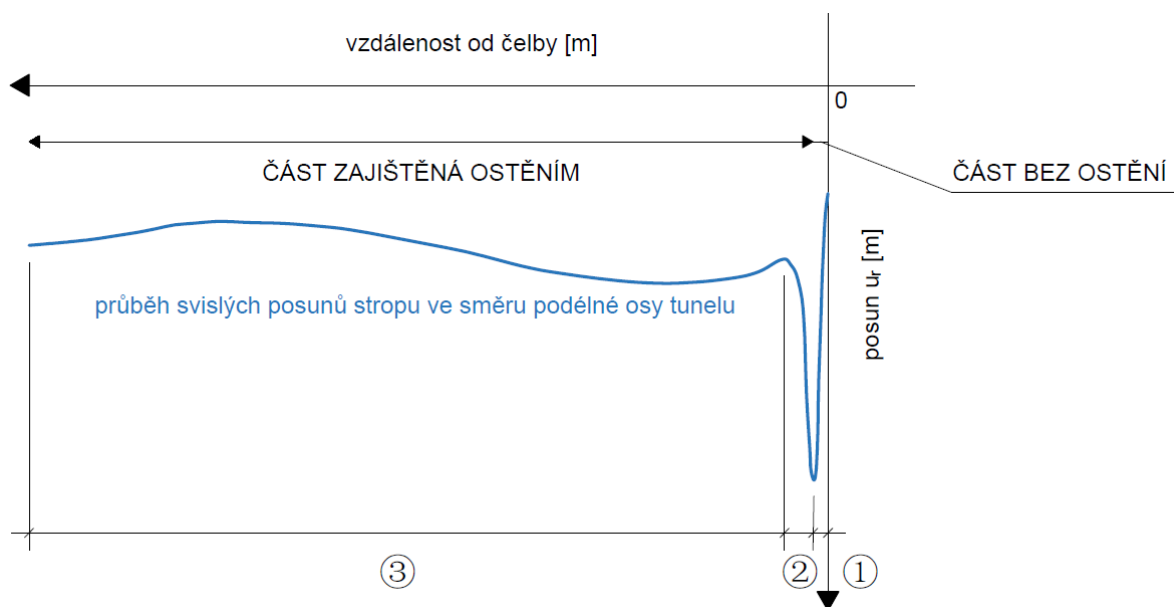
$$\beta_2 = k_1 \cdot \frac{1}{(34,456 \left(\frac{x}{r_i}\right)^2 - 27,228 \frac{x}{r_i} + 7,702)} + k_2 \cdot e^{0,716 \left(\frac{x}{r_i}\right)^2 - 3,47 \frac{x}{r_i}} \quad (38)$$

$$\beta_3 = k_1 \cdot 1529,741 \left(\frac{x}{r_i}\right)^{8,875} e^{-7,479 \frac{x}{r_i}} + k_2 \cdot \left(\frac{x}{r_i}\right)^{-0,017} e^{-0,125 \left(\frac{x}{r_i}\right)^{-4,598}} \quad (39)$$

4. Srovnání hodnot součinitele relaxace získaného variantními přístupy

Součinitel relaxace byl nejprve stanovován pro tunelové dílo bez ostění nebo zajištěné ostěním až k čelbě. Změna míry relaxace byla aplikována ve dvou modelových fázích, přičemž hodnoty posunů z první fáze byly eliminovány, aby byl zohledněn vliv čelby na velikost svislých posunů stropu. Z výpočtů pro dílo bez ostění nebo s ostěním až k čelbě vyplynulo, že čím je hodnota součinitele relaxace v druhé fázi (fázi instalace ostění) vyšší, tím vyšší hodnotu svislého posunu dostaneme (odpovídá nižšímu vlivu čelby). Při hodnotě součinitele relaxace $\beta = 1$ tedy dostáváme maximální posuny ostění a při hodnotě $\beta = 0$, kdy relaxace proběhla již před instalací ostění, posuny minimální.

U tunelového díla, zajištěného ostěním až od určité vzdálenosti od čelby, byl součinitel relaxace β aplikován ve třech modelových fázích. Součinitel relaxace β_1 odpovídá relaxaci horninového masivu před instalací ostění, tzn. nezajištěnému úseku tunelového díla (viz oblast ① na Obr. 25). S narůstající vzdáleností od čelby hodnota tohoto součinitele klesá. Naopak součinitel relaxace β_3 odpovídá relaxaci masivu po instalaci ostění (viz oblast ③), takže s narůstající vzdáleností od čelby se hodnota tohoto součinitele zvětšuje. Součinitel relaxace β_2 (viz oblast ②) odpovídá relaxaci horninového masivu před instalací ostění, avšak nedochází u něj k eliminaci posunů, jak u součinitele β_1 .



Obr. 25 Rozdělení průběhu svislých posunů stropu na oblasti dle vlivu jednotlivých součinitelů relaxace (pro tunelové dílo zajištěné až od určité vzdálenosti od čelby)

Následující tabulky shrnují stanovené regresní funkce pro odvození součinitele relaxace β , jak pro dílo bez ostění (resp. zajištěné ostěním až k čelbě; viz Tabulka 12), tak pro dílo zajištěné ostěním až od určité vzdálenosti od čelby (viz Tabulka 13 – 15).

β	regresní funkce relaxačního součinitele β závisí na:	
	vzdálenosti od čelby	poměru x/r_i
dílo bez ostění	$\beta = 1,021e^{-\frac{1,146}{(x+0,676)}}$	$\beta = 1,021e^{-\frac{0,229}{(\frac{x}{r_i}+0,135)}}$
dílo s ostěním až k čelbě	$\beta = 0,286 \ln(x + 0,475) + 0,306$	$\beta = 0,286 \ln\left(\frac{x}{r_i} + 0,095\right) + 0,767$

Tabulka 12 Přehled regresních funkcí relaxačního součinitele β pro tunelové dílo bez ostění (resp. s ostěním až k čelbě)

β_1		regresní funkce relaxačního součinitele β_1 závisí na vzdálenosti od čelby
dílo s ostěním vzdáleným od čelby	1 m	$\beta_1 = k_1 \cdot \frac{2,587}{(x + 2,639)} + k_2 \cdot 0,629e^{-0,061x^2+0,182x}$
	2 m	$\beta_1 = k_1 \cdot \left(\frac{0,003}{x + 0,014} + 0,701\right) + k_2 \cdot 0,511e^{-0,07x^2+0,309x}$
	5 m	$\beta_1 = k_1 \cdot 0,87e^{-0,162x^2+0,243x} + k_2 \cdot 0,774e^{-0,11x^2}$
β_1		regresní funkce relaxačního součinitele β_1 závisí na poměru x/r_i
dílo s ostěním vzdáleným od čelby	1 m	$\beta_1 = k_1 \cdot \frac{0,517}{(\frac{x}{r_i} + 0,528)} + k_2 \cdot 0,629e^{-1,518(\frac{x}{r_i})^2+0,911\frac{x}{r_i}}$
	2 m	$\beta_1 = k_1 \cdot \left(\frac{0,0007}{\frac{x}{r_i} + 0,0029} + 0,701\right) + k_2 \cdot 0,512e^{-1,745(\frac{x}{r_i})^2+1,546\frac{x}{r_i}}$
	5 m	$\beta_1 = k_1 \cdot 0,87e^{-4,056(\frac{x}{r_i})^2+1,217\frac{x}{r_i}} + k_2 \cdot 0,774e^{-2,739(\frac{x}{r_i})^2}$

Tabulka 13 Přehled regresních funkcí relaxačního součinitele β_1 pro tunelové dílo zajištěné ostěním až od určité vzdálenosti od čelby

β_2		regresní funkce relaxačního součinitele β_2 závisí na vzdálenosti od čelby
dílo s ostěním vzdáleným od čelby	1 m	$\beta_2 = k_1 \cdot 0,071 \ln(x + 1,331) + k_2 \cdot 0,074 e^{0,009x^2 - 0,217x}$
	2 m	$\beta_2 = k_1 \cdot (-0,159x + 0,274x^{\frac{1}{2}} + 0,061) + k_2 \cdot \frac{1}{(135,501x^{0,133} - 140,254)}$
	5 m	$\beta_2 = k_1 \cdot \frac{1}{(1,378x^2 - 5,446x + 7,702)} + k_2 \cdot e^{0,029x^2 - 0,694x}$
β_2		regresní funkce relaxačního součinitele β_2 závisí na poměru x/r_i
dílo s ostěním vzdáleným od čelby	1 m	$\beta_2 = k_1 \cdot (0,2 \frac{x}{r_i} + 0,02) + k_2 \cdot 0,074 e^{0,223(\frac{x}{r_i})^2 - 1,085 \frac{x}{r_i}}$
	2 m	$\beta_2 = k_1 \cdot \left(\frac{1}{145,666(\frac{x}{r_i})^2 - 75,844(\frac{x}{r_i}) + 14,987} \right) + k_2 \cdot \left(\frac{1}{184,242(\frac{x}{r_i})^{0,121} - 156,612} \right)$
	5 m	$\beta_2 = k_1 \cdot \frac{1}{(34,456(\frac{x}{r_i})^2 - 27,228 \frac{x}{r_i} + 7,702)} + k_2 \cdot e^{0,716(\frac{x}{r_i})^2 - 3,47 \frac{x}{r_i}}$

Tabulka 14 Přehled regresních funkcí relaxačního součinitele β_2 pro tunelové dílo zajištěné ostěním až od určité vzdálenosti od čelby

β_3		regresní funkce relaxačního součinitele β_3 závisí na vzdálenosti od čelby
dílo s ostěním vzdáleným od čelby	1 m	$\beta_3 = k_1 \cdot 0,23x^{0,909} + k_2 \cdot \frac{1}{(0,059x^2 - 1,144x + 5,896)}$
	2 m	$\beta_3 = k_1 \cdot 0,12x^{0,503} + k_2 \cdot \frac{1}{(0,079x^2 - 1,586x + 8,262)}$
	5 m	$\beta_3 = k_1 \cdot 0,00025x^{10,859} e^{-1,864x} + k_2 \cdot x^{-0,006} e^{-227,213x^{-4,721}}$
β_3		regresní funkce relaxačního součinitele β_3 závisí na poměru x/r_i
dílo s ostěním vzdáleným od čelby	1 m	$\beta_3 = k_1 \cdot 0,865 \left(\frac{x}{r_i} \right)^{0,823} + k_2 \cdot \frac{1}{(1,478(\frac{x}{r_i})^2 - 5,719 \frac{x}{r_i} + 5,896)}$
	2 m	$\beta_3 = k_1 \cdot 0,269 \left(\frac{x}{r_i} \right)^{0,503} + k_2 \cdot \frac{1}{(1,978(\frac{x}{r_i})^2 - 7,928 \frac{x}{r_i} + 8,262)}$
	5 m	$\beta_3 = k_1 \cdot 1529,741 \left(\frac{x}{r_i} \right)^{8,875} e^{-7,479 \frac{x}{r_i}} + k_2 \cdot \left(\frac{x}{r_i} \right)^{-0,017} e^{-0,125(\frac{x}{r_i})^{-4,598}}$

Tabulka 15 Přehled regresních funkcí relaxačního součinitele β_3 pro tunelové dílo zajištěné ostěním až od určité vzdálenosti od čelby

5. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo stanovení hodnoty součinitele relaxace β pro odvození velikosti a průběhu svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu jen s využitím rovinného matematického modelu.

Svislé posuny, jejich průběhy a hodnoty součinitele relaxace byly určovány pro tunelové dílo poloměru 5 m s okolním horninovým masivem tvořeným šterkovitou hlínou pevné konzistence. Rovinné a prostorové modely tunelového díla byly počítány metodou konečných prvků a to jak pro dílo bez ostění, tak zajištěné ostěním. Dílo bez ostění bylo spočteno v lineárně pružném a pružně-ideálně plastickém oboru přetváření a získané svislé posuny stropu porovnány s analytickou metodou convergence-confinement a jejím součinitelem uvolnění napětí λ_d . Průběhy svislých posunů stropu získaných z tohoto analytického řešení kopírují průběh svislých posunů stropu z modelu prostorového, jestliže je uvažován lineárně pružný model přetváření. Za předpokladu plastického modelu přetváření je rozdíl v průběhu svislých posunů z modelu prostorového a analytického řešení výrazný. To je dáno zjednodušením analytických řešení vůči složitým matematickým modelům. Při jejich použití však získáme alespoň základní představu o chování analyzovaného systému. Posléze byly vypočteny svislé posuny stropu v tunelovém díle zajištěném ostěním vrstvou betonu třídy C 12/15 o tloušťce 0,15 m po celém obvodu výrubu. U tohoto modelu tunelu, při uvažování lineárně pružného chování, byl maximální svislý posun stropu získaný z modelu prostorového oproti posunu z modelu rovinného přibližně o 23 % větší.

Další část diplomové práce se věnuje jejímu hlavnímu tématu a to stanovení součinitele relaxace β , který simuluje postupnou relaxaci horninového masivu při odlehčení vyražením díla. Tento součinitel vychází z metody redukce napětí a byl stanovován pro dílo bez ostění, s ostěním až k čelbě a s ostěním vzdáleným 1, 2 a 5 m od čelby. Změna relaxačního součinitele byla aplikována v rovinném modelu tunelového díla na základě porovnávání s průběhem svislých posunů stropu ve směru podélné osy prostorového modelu.

Nejprve byl stanovován součinitel relaxace pro dílo bez ostění, resp. s ostěním až k čelbě. Vypočtené závislosti součinitele relaxace na vzdálenosti od čelby (resp. poměru x/r_i) byly vyneseny do grafů a následně jejich průběhy proloženy nelineárními regresemi. Pro praktické použití byly získané regrese vyjádřené pomocí funkcí, aby byl umožněn snadný přepočet k získání svislých posunů stropu.

Dále byl studován vliv ostění instalovaného až od určité vzdálenosti od čelby na velikost součinitele relaxace β . Nejprve byl vždy numericky spočten prostorový model tohoto částečně zajištěného tunelu pro získání průběhu svislých posunů stropu ve směru jeho podélné osy. Poté byly stanovovány hodnoty součinitele relaxace v rovinném matematickém modelu na základě β -metody. Při instalaci ostění až od určité vzdálenosti od čelby, byla relaxace v rovinném modelu aplikována ve třech modelových krocích. Závislosti jednotlivých součinitelů relaxace na vzdálenosti od čelby (resp. na poměru x/r_i) byly vyneseny do grafů. Každá závislost byla proložena nelineární regresí a vyjádřena funkcí pro snadné získání průběhu svislých posunů stropu pouze z radiálního posunu rovinného modelu a stanovených součinitelů relaxace β .

Jelikož přetvárné projevy vyplývající z ražby díla závisí na mnoha faktorech, mezi základní z nich patří hloubka, velikost a tvar výrubu, charakter ostění, délka záběru, geologie horninového masivu a vlastnosti horninového prostředí, k ověření stanovených regresních funkcí pro stanovení součinitele relaxace by bylo třeba provést větší množství numerických výpočtů pro variantní vstupní data. Dále by bylo velmi přínosné provést jejich kalibraci a verifikaci na základě výsledků geotechnického monitoringu.

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat paní doc. RNDr. Evě Hrubéšové, Ph.D. za její odborné vedení, poskytování cenných rad, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování diplomové práce věnovala. Děkuji také panu Ing. Věroslavovi Hrubému, Ph.D. za užitečné náměty a připomínky.

6. Seznam použitých pramenů

Seznam knižních a internetových zdrojů

- [1] Význam vodorovného kotvení čelby pro zlepšení deformačních vlastností ražbou ovlivněného horninového masivu a snížení zatížení ostění
[online]. [cit. 2016-06-14].
Dostupné z: http://www.ita-aites.cz/files/tunel/2009/1/tunel_1_09-7.pdf
- [2] Klepsatel, F., Kusý, P., Mařík, L. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. Jaga:Bratislava, 2003. ISBN 80-88905-43-5.
- [3] Klepsatel, F., Mařík, L., *Městské podzemní stavby*. Jaga:Bratislava, 2005. ISBN 80-8076-021-7.
- [4] Metoda konečných prvků – Základy konstitutivního modelování
[online]. [cit. 2016-09-20].
Dostupné z: <http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/3-Zaklady-konstitutivniho-modelovani.pdf>
- [5] Metoda konečných prvků – Základy konstitutivního modelování
[online]. [cit. 2016-09-20].
Dostupné z: <http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/1-Uvod.pdf>
- [6] Dao, V. Tunnel design considering stress release effect. *Water Science and Engineering*, 2009, 2(3). pp. 87-95.
- [7] Finite element modelling for tunneling excavation
[online]. [cit. 2016-11-09].
Dostupné z: [http://constructii.utcluj.ro/ActaCivilEng/download/atn/ATN2012\(1\)_9.pdf](http://constructii.utcluj.ro/ActaCivilEng/download/atn/ATN2012(1)_9.pdf)
- [8] Úvod Plasticita
[online]. [cit. 2016-09-20].
Dostupné z: http://www.kmp.tul.cz/system/files/1_plast_uvod.pdf

- [9] Návrhové přístupy
[online]. [cit. 2016-11-16].
Dostupné z: <http://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/navrhove-pristupy-01/>
- [10] Statika a dynamika geotechnických staveb
[online]. [cit. 2016-11-16].
Dostupné z: http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/Vyukova-prezentace_-_Statika-a-dynamika-geotechnickych-staveb.pdf

Seznam obrázků

Obr. 1 Deformační odezva horniny při ražbě [1]	9
Obr. 2 Typické tvary konečných prvků [7]	14
Obr. 3 Lineárně pružný model [4].....	15
Obr. 4 Pružně-ideálně plastický model [8].....	15
Obr. 5 Přístupy rovinného modelování (rovinná napjatost, rovinná deformace, osově symetrická napjatost) [7].....	16
Obr. 6 Gap model [7]	17
Obr. 7 Redukce tuhosti horninového masivu v oblasti výrubu	17
Obr. 8 Rozdělení primárního napětí do dvou částí při rovinném řešení β -metodou [2]	18
Obr. 9 Princip β -metody	19
Obr. 10 Schéma výpočtového rovinného modelu	20
Obr. 11 Schéma výpočtového prostorového modelu	21
Obr. 12 Síť konečných prvků rovinného modelu	21
Obr. 13 Síť konečných prvků prostorového modelu	21
Obr. 14 Profil radiálních svislých posunů stropu u_r - tunel nezajištěný ostěním [6].....	23
Obr. 15 Průběh svislého napětí σ_z před provedením výrubu.....	25
Obr. 16 Průběh svislého napětí σ_z po provedení výrubu	25
Obr. 17 Svislé posuny rovinného modelu – tunel bez ostění	25
Obr. 18 Průběh svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu prostorového matematického modelu získaný metodou konečných prvků pomocí softwaru MIDAS GTS NX - tunel bez ostění.....	26
Obr. 19 Fenner-Pacherova křivka [6].....	31

Obr. 20 Rozdílné způsoby modelování ostění tunelu [7]	31
Obr. 21 Rovinný model výrubu a ostění tvořené sítí konečných trojúhelníkových prvků.....	32
Obr. 22 Ostění tunelu v prostorovém numerickém modelu tvořené sítí konečných prvků.....	32
Obr. 23 Svislé posuny rovinného modelu – dílo s ostěním.....	34
Obr. 24: Znázornění charakteristických bodů průběhu svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu získaného z prostorového modelu částečně zajištěného díla ostěním	38
Obr. 25 Rozdělení průběhu svislých posunů stropu na oblasti dle vlivu jednotlivých součinitelů relaxace (pro tunelové dílo zajištěné až od určité vzdálenosti od čelby)	49

Seznam grafů

Graf č. 1 Součinitel uvolnění napětí λ_d na obrysu tunelu nezajištěného ostěním ve směru jeho podélné osy	24
Graf č. 2 Průběhy svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu vyplývající z numerického a analytického řešení v oboru pružného přetváření - tunel bez ostění	26
Graf č. 3 Průběh svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu vyplývající z numerického a analytického řešení v oboru plastického přetváření - tunel bez ostění .	28
Graf č. 4 Průběh svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu vyplývajících z numerického řešení v oboru pružného přetváření – tunel s ostěním.....	34
Graf č. 5 Závislost součinitele relaxace β na vzdálenosti od čelby	37
Graf č. 6 Závislost součinitele relaxace β na poměru x/r_i	37
Graf č. 7 Průběh svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu získaného z prostorového modelu pro dílo zajištěné ostěním až od vzdálenosti 1 m od čelby	40
Graf č. 8 Závislost β -součinitele na vzdálenosti x od čelby pro dílo zajištěné ostěním 1 m od čelby	41
Graf č. 9 Závislost β -součinitele na poměru x/r_i (x je vzdálenost od čelby, r_i je poloměr díla) pro dílo zajištěné ostěním 1 m od čelby.....	42
Graf č. 10 Průběh svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu získaného z prostorového modelu pro dílo zajištěné ostěním až od vzdálenosti 2 m od čelby	43
Graf č. 11 Závislost β -součinitele na vzdálenosti x od čelby pro dílo zajištěné ostěním 2 m od čelby	44
Graf č. 12 Závislost β -součinitele na poměru x/r_i (x je vzdálenost od čelby, r_i je poloměr díla) pro dílo zajištěné ostěním 2 m od čelby.....	45

Graf č. 13 Průběh svislých posunů stropu ve směru podélné osy tunelu získaného z prostorového modelu pro dílo zajištěné ostěním až od vzdálenosti 5 m od čelby	46
Graf č. 14 Závislost β -součinitele na vzdálenosti x od čelby pro dílo zajištěné ostěním 5 m od čelby	47
Graf č. 15 Závislost β -součinitele na poměru x/r_i (x je vzdálenost od čelby, r_i je poloměr díla) pro dílo zajištěné ostěním 5 m od čelby	48

Seznam tabulek

Tabulka 1 Hodnoty součinitele podmínek působení γ_u podle ČSN 73 7501 [3]	11
Tabulka 2 Hodnoty dílčích součinitelů pro zatížení nebo účinky zatížení [10]	12
Tabulka 3 Hodnoty dílčích součinitelů pro parametry zeminy [10]	12
Tabulka 4 Hodnoty dílčích součinitelů pro odpor materiálu (únosnost) [10]	12
Tabulka 5 Navržené fyzikální a mechanické parametry	20
Tabulka 6 Hodnoty svislých posunů stropu díla prostorových modelů za předpokladu lineárně pružného a pružně-ideálně plastického konstitutivního modelu chování	29
Tabulka 7 Hodnoty svislých posunů stropu rovinného modelu díla nezajištěného ostěním při aplikaci β -metody	35
Tabulka 8 Hodnoty svislých posunů stropu rovinného modelu díla zajištěného ostěním při aplikaci β -metody	36
Tabulka 9 Velikost β -součinitelů v charakteristických bodech průběhu svislého posunu stropu ve směru podélné osy tunelu pro dílo zajištěné ostěním až od vzdálenosti 1 m od čelby	40
Tabulka 10 Velikost β -součinitelů v charakteristických bodech průběhu svislého posunu stropu ve směru podélné osy tunelu pro dílo zajištěné ostěním až od vzdálenosti 2 m od čelby	43
Tabulka 11 Velikost β -součinitelů v charakteristických bodech průběhu svislého posunu stropu ve směru podélné osy tunelu pro dílo zajištěné ostěním až od vzdálenosti 5 m od čelby	46
Tabulka 12 Přehled regresních funkcí relaxačního součinitele β pro tunelové dílo bez ostění (resp. s ostěním až k čelbě)	50
Tabulka 13 Přehled regresních funkcí relaxačního součinitele β_1 pro tunelové dílo zajištěné ostěním až od určité vzdálenosti od čelby	50

Tabulka 14 Přehled regresních funkcí relaxačního součinitele β_2 pro tunelové dílo zajištěné ostěním až od určité vzdálenosti od čelby	51
Tabulka 15 Přehled regresních funkcí relaxačního součinitele β_3 pro tunelové dílo zajištěné ostěním až od určité vzdálenosti od čelby	51